



**Pedro Emanuel
Dos Santos Freire**

***Logger* Solar Independente de Inversor**
Inverter Independent Solar Data Logger



**Pedro Emanuel
Dos Santos Freire**

***Logger* Solar Independente de Inversor
Inverter Independent Solar Data Logger**

*“Logic will get you from A to B. Imagination will take you every-
where.”*

— Albert Einstein



**Pedro Emanuel
Dos Santos Freire**

Logger Solar Independente de Inversor
Inverter Independent Solar Data Logger

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Paulo Bacelar Reis Pedreiras, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e do Prof. Doutor Valter Filipe Miranda Castelão da Silva, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda da Universidade de Aveiro.

o júri / the jury

presidente / president

Prof. Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins

professor auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Prof. Doutor Valter Filipe Miranda Castelão da Silva

professor adjunto da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Frederico Miguel do Céu Marques dos Santos,

professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**agradecimentos /
acknowledgements**

Agradeço a esta grande academia pela formação que recebi, pelos desafios que me lançou e pelo nível de exigência que encontrei. Gostaria de deixar um especial agradecimento ao Prof. Doutor Paulo Pedreiras e ao Prof. Doutor Valter Silva por toda a orientação dada neste trabalho. Agradecendo ainda ao Eng. Manuel Arez, Sr. Paulo Gonçalves e ao Instituto de Telecomunicações pelo apoio. Deixo ainda um grande abraço a todos os meus amigos pela sua paciência e apoio e um agradecimento especial a toda a minha família e namorada. Um muito obrigado a todos!

Palavras Chave

Tecnologia Fotovoltaica, Monitorização, *Logger*, Sensores, Plataforma Web, Independente de Inversor, microcontroladores, instrumentação

Resumo

A produção de energia elétrica, através de fontes renováveis, tem vindo a aumentar de forma significativa em Portugal nos últimos anos, deixando evidente a forte aposta de que estes sistemas têm sido alvo. Devido ao elevado investimento adjacente à geração de energia elétrica solar, torna-se de forma quase obrigatória a utilização de um sistema de monitorização para proporcionar uma vigia constante sobre o desempenho e estado do sistema. Os dados recolhidos poderão ser de grande utilidade para exercer um controlo financeiro, identificar anomalias, ou mesmo para verificar se as características de funcionamento se encontram dentro dos parâmetros especificados na garantia do produto. Atualmente, já existe uma vasta gama de *loggers* solares no mercado, possibilitando desde uma monitorização básica até um nível mais avançado. Dos quais, os mais robustos apresentam-se na sua grande maioria como dependentes do inversor ou, quando desenvolvidos por empresas independentes, compatíveis com uma lista de inversores, não sendo compatíveis com qualquer sistema. Tendo em vista a superação da característica de dependência e a conceção de um produto mais barato, o presente trabalho, pretende elaborar a prova de conceito de um dispositivo de monitorização de baixo custo que possibilite a análise de qualquer sistema de geração e que possua características que o distingam dos produtos similares já existentes. Pretende-se assim, criar um dispositivo que, através de uma plataforma web, coloque à disposição do utilizador históricos de energia, relatórios periódicos, alertas via email e identificação de anomalias no sistema. O dispositivo aqui projetado, obtém a informação do sistema através da amostragem da tensão e corrente AC e DC. Sendo utilizados sensores de tensão e corrente apropriados. Posteriormente, os dados são processados por um microcontrolador que gere toda a monitorização. Por último, o acesso à informação gerada e a própria configuração do *logger* é disponibilizada através de uma plataforma *WEB*.

Keywords

photovoltaic technology, monitoring, data logger, sensors, web platform, inverter independent, microcontrollers, instrumentation

Abstract

The production of electric energy through renewable resources have been increasing significantly in Portugal during the last years, leaving no doubts about the great demand of this kind of systems. Due to the big investment required to its implementation, its essential to use a monitoring device in order to constantly analyse the performance and the state of the equipment. The collected data could become very useful to implement a financial control, identify anomalies, or even to verify if the performance of the equipment is according to the characteristics specified in the product warranty. Nowadays, there's already a lot of solar loggers in the market, offering monitoring from a basic level to a more advanced one. Where, the most robust are mostly inverter dependent. Usually when developed by independent companies, they're compatible with a list of inverters, not being suitable for all generation systems. Trying to overcome the dependency limitation and project a low cost device, in this work is intended to develop the concept proof of a low cost device which allows the monitoring of any production system regardless of the used inverter with features that can distinguish it from similar devices already in the market. Thus, it's intended to develop a device that displays the collect information and makes possible the system configuration through a web platform, where the user can find energy and financial history, periodic reports, alerts via email and the comparison between the actual performance and the one that the system should have. The projected device extracts the information of the generation system by sampling the voltage and current in both sides of the inverter. In order to sample those values there are used proper voltage and current sensors. Then, all the data is processed by a micro-controller which is responsible for all monitoring tasks. Finally, the access to the generated information and the configuration of the solar logger is available on a web interface.

CONTEÚDO

CONTEÚDO	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vii
GLOSSÁRIO	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Organização do documento	3
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 O Sistema de geração	5
2.1.1 Infraestrutura	6
2.1.2 Performance do Sistema	8
2.1.3 O Mercado	9
2.2 Monitorização de Sistemas Fotovoltaicos	10
2.2.1 Sistemas Dependentes do Inversor	11
2.2.2 Sistemas Independentes do Inversor	12
2.2.3 Standard IEC 61724:1998	14
2.2.4 O mercado	16
2.3 Métodos de Análise e Detecção de Anomalias	18
2.3.1 Regression-Based Linear Modelling	18
2.3.2 PVSAT-2	21
2.4 A Potência em Cargas Lineares e Não Lineares	23
2.4.1 Potência em cargas lineares	23
2.4.2 Potência em cargas não-lineares	24
2.5 Sensores de Corrente	25
2.5.1 Transformadores de Corrente	25
2.5.2 Sensores de corrente baseados no efeito de Hall	27
2.5.3 Resistência <i>Shunt</i>	29
2.6 Sensores de Tensão	30
2.6.1 Transformadores	30
2.6.2 Divisores Resistivos	31
2.6.3 Sensor de efeito de Hall	31
2.7 Sensores de Radiação	32

3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA	35
3.1	Sensores e circuitos de acondicionamento	36
3.1.1	Sensores de Tensão	36
3.1.2	Sensores de Corrente	40
3.1.3	Sensor de radiação solar	44
3.2	Processamento e servidor WEB	45
3.3	Tensões de Alimentação	46
3.4	Prototipagem do circuito	50
3.5	Firmware	52
3.5.1	Inicialização do dispositivo	52
3.5.2	Processamento dos dados	52
3.5.3	Base de Dados	55
3.6	Plataforma WEB	56
3.6.1	Bibliotecas e APIs	57
3.6.2	Páginas dinâmicas	57
3.6.3	Estruturas de dados	58
3.6.4	A plataforma e suas funcionalidades	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	Placa de desenvolvimento	63
4.2	Hardware	64
4.2.1	Sensor de Corrente AC	64
4.2.2	Sensor de Corrente DC	65
4.2.3	Tensão DC	66
4.2.4	Tensão AC	68
4.3	Fontes de alimentação	69
4.4	Software	69
4.5	Firmware	70
5	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	71
5.1	Trabalho Futuro	72
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO A: SOFTWARE	77
	A1: Plataforma WEB	77
	ANEXO B: ESQUEMAS ELÉTRICOS	83
	B1: Fontes de Alimentação	83
	B2: Sensores e Acondicionamento de Sinal	83
	ANEXO C: HARDWARE	85
	C1: Desenho da PCB no EAGLE	85
	C2: Impressão da PCB	86
	C3: Junção do hardware	87

LISTA DE FIGURAS

1.1	Diagrama de blocos do sistema	2
2.1	Circuito equivalente simplificado de uma célula solar(fonte: [4])	6
2.2	Constituição de um <i>array</i> de painéis (fonte: [4])	6
2.3	Componentes principais de um sistema FV (fonte: [4])	7
2.4	Diagrama de sistema FV autónomo (fonte: [4])	7
2.5	Diagrama de sistema FV ligado à rede elétrica (fonte: [4])	8
2.6	Curva de aprendizagem: gráfico do preço do produto em função da experiência (fonte:[8])	9
2.7	Evolução do preço dos painéis fotovoltaicos desde 1980 em função da produção cumulativa (fonte:[8])	10
2.8	Evolução do preço dos inversores a partir dos anos 90 (fonte:[8])	10
2.9	Diagrama do sistema SMA web box (fonte:[20])	12
2.10	Comparação de sistemas de monitorização existentes no mercado (fonte: [21]–[27])	13
2.11	Diagrama do sistema <i>Caresolar</i> (fonte:[24])	14
2.12	Análise competitiva do mercado de monitorização fotovoltaica (fonte:[7])	17
2.13	Diagrama das relações lineares existentes no sistema FV (fonte:[17])	19
2.14	Performance de um sistema de geração com o crescimento da vegetação em seu redor FV (fonte:[17])	19
2.15	Variação do <i>pr</i> em função da temperatura dos módulos FV (fonte:[17])	20
2.16	Tensão DC normalizada com o valor de tensão MPP em função da temperatura dos módulos FV (fonte:[17])	20
2.17	Descrição geral do sistema PVSAT-2 (fonte:[32])	21
2.18	Esquema geral do sistema PVSAT-2 (fonte:[32])	22
2.19	Campo magnético na corrente elétrica (fonte:[46])	26
2.20	Transformador de corrente (fonte:[48])	26
2.21	Princípio do efeito de Hall (fonte:[46])	27
2.22	Ângulo entre condutor e campo magnético no sensor de Hall (a); Símbolo elétrico do sensor de Hall (b) (fonte:[46])	28
2.23	Esquema básico de sensor de Hall com saída linear (fonte:[49])	28
2.24	Sensor linear de corrente típico (fonte:[49])	29
2.25	Amostragem da tensão AC com transformador e divisor resistivo (fonte:openenergymonitor.org)	31
2.26	EM010 sensor (fonte:[53])	31
2.27	Piranómetro (fonte:[54])	32
2.28	Célula solar de referência (fonte:[54])	33

3.1	Módulos principais do sistema	35
3.2	Diagrama de blocos geral do sistema	36
3.3	Diagrama de blocos para o circuito de leitura da tensão DC	38
3.4	Circuito de leitura da tensão DC	38
3.5	Diagrama de blocos do circuito de leitura da tensão AC	39
3.6	Circuito para a leitura da tensão AC	40
3.7	Diagrama de blocos do circuito de leitura de corrente DC	41
3.8	Circuito de leitura da corrente DC	42
3.9	Curva de resposta dos sensores da serie CS60 (fonte: [58])	43
3.10	Diagrama de blocos do circuito de corrente AC	43
3.11	Circuito eléctrico do sensor de corrente AC e respectivo circuito de acondicionamento	44
3.12	Mini painel solar SOL4 Velleman	44
3.13	Circuito do sensor de radiação solar	44
3.14	Placa de desenvolvimento PIC-WEB	45
3.15	Circuito implementado para o cartão de memória e RTC	46
3.16	Módulo para cartão de memória	46
3.17	Esquema de fontes de alimentação	47
3.18	Diagrama com os consumos de corrente	47
3.19	Diagrama de blocos das fontes de alimentação da parte electrónica	48
3.20	Circuito eléctrico das fontes de tensão de 12V, 5V, e 3.3V	49
3.21	Circuito eléctrico da fonte de -12V	50
3.22	Fontes de Alimentação para os amplificadores de Isolamento	50
3.23	Circuito das fontes de alimentação 5V para os amplificadores de isolamento	50
3.24	Organização dos elementos na PCB	51
3.25	Diagrama temporal das operações de processamento	53
3.26	Ilustração de buffer circular (fonte:luaVIEW)	53
3.27	Fluxograma simplificado das rotinas de serviço à interrupção dos timers usados	53
3.28	Fluxograma simplificado do processamento dos dados na main do programa	55
3.29	Organização dos elementos no cartão de memória	56
3.30	Estrutura de dados a ser guardada no cartão de memória	56
3.31	Ficheiro XML obtido com a simulação da operação do sistema	58
3.32	Diagrama de processo de <i>login</i>	59
4.1	Gráficos de um período da corrente AC (termo-ventilador em modo mínimo e máximo) amostrados pelo <i>hardware</i> durante o funcionamento do termo-ventilador	65
4.2	Linearização entre os valores medidos pelo <i>hardware</i> e amperímetro	65
4.3	Relação entre corrente DC medida pela ADC e amperímetro	66
4.4	Relação entre tensão DC medida pela ADC e amperímetro	67
4.5	Tensão da rede eléctrica medida pelo <i>hardware</i>	68
4.6	Relação entre a tensão da rede eléctrica medida pelo <i>hardware</i> e voltímetro	69
4.7	Teste do algoritmo de processamento	70
1	Página de informação geral da plataforma para um ecrã mobile	77
2	Página geral da plataforma	78
3	Página de alertas do sistema	79
4	Página de gestão de energia do sistema	80
5	Página de definições do sistema	81
6	Circuitos eléctricos das fontes electrónicas	83
7	EM010 sensor	84

8	Desenho da PCB no eagle	85
9	Impressão da PCB	86
10	Fotografia do <i>hardware</i> do <i>logger</i>	87

LISTA DE TABELAS

2.1	Exemplos de inversores existentes no mercado para várias potências (fontes:[9]–[16])	8
2.2	Tabela de parâmetros a serem monitorizados em tempo real segundo a norma IEC 61724 (fonte:[28])	15
2.3	Lista do erro percentual máximo para cada um dos parâmetros (fonte: [28]) . . .	15
3.1	Lista de amplificadores de isolamento resultante da pesquisa de mercado	37
3.2	Valores calculados para os componentes principais do circuito de leitura da tensão DC	38
3.3	Valores calculados para os componentes principais do circuito de leitura da tensão AC	40
3.4	Lista de sensores de corrente	41
3.5	Valores calculados para os componentes principais do circuito de leitura da corrente DC	42
3.6	Valores calculados para os componentes principais do circuito de leitura da corrente AC	43
3.7	Listagem dos componentes principais da PCB	51
3.8	Descrição das zonas de memória	56
3.9	Descrição dos campos do ficheiro XML relativo à consulta do registo de monitorização	59
4.1	Valor eficaz da corrente medida pelo <i>hardware</i> e amperímetro para cada modo do termo-ventilador	64
4.2	Valor médio e respectivo desvio padrão para as correntes DC para as várias resistências	66
4.3	Valores médios medidos pelo <i>hardware</i> e osciloscópio com respectivo desvio padrão	67
4.4	Valor eficaz da tensão medido pelo <i>logger</i> e voltímetro em dois locais diferentes .	68
4.5	Valores de tensão medidos para cada uma das fontes	69

GLOSSÁRIO

AC	Alternating current	I²C	Inter-Integrated Circuit
ADC	Analogic Digital Converter	MPP	Maximum Power Point
AJAX	Asynchronous Javascript and XML	MPPT	Maximum Power Point Tracking
API	Application Programming Interface	MSSP	Master Synchronous Serial Port
DC	Direct Current	PCB	Printed Circuit Board
FER	Fontes de Energia Renováveis	RTC	Real Time Clock
FV	Fotovoltaico	SPI	Serial Peripheral Interface
HTTP	Hypertext Transfer Protocol	TCP	Transmission Control Protocol

INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem apresentado um claro desenvolvimento na última década, existindo em Portugal um crescimento médio anual de 79% na comercialização de energia nos regimes de mini e micro produção. A produção a partir de Fontes de Energia Renováveis (FER), apresentou durante o período compreendido entre março de 2014 e fevereiro de 2015 um peso de 55.2% relativamente à produção bruta em conjunto com a energia importada. Embora não sendo a tecnologia que mais contribui para estes números, a geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos apresenta-se, em termos tecnológicos, como a que mais se desenvolveu de Fevereiro de 2006 a 2015, tendo evoluído de uma potência instalada residual para 426MW[1]. Em Portugal, a sua exploração, dependendo da quantidade de energia contratada, pode ser realizada nos regimes de mini-geração e micro-produção[2], tendo sido recentemente legalizado também a sua exploração para auto-consumo [3].

No seio destes sistemas, os módulos fotovoltaicos possibilitam a transformação da energia solar em energia elétrica contínua, existindo posteriormente, um conversor destinado à conversão da energia DC em AC para que a mesma possa ser consumida ou injetada na rede pública [4]. Devido ao elevado investimento associado à implementação destes sistemas, a sua monitorização torna-se num elemento bastante importante, pois além de permitir a recolha de dados relativos à produção, torna também possível a identificação e comunicação de anomalias através do envio de alertas, conduzindo à deteção rápida de problemas minimizando o prejuízo associado [5]. Além destas vantagens, a monitorização, quando aplicada também ao consumo, poderá conduzir a uma diminuição até 10% no consumo de energia devido a alterações comportamentais dos seus utilizadores, deixando-os de certa forma mais sensibilizados para com os gastos energéticos [6].

Atualmente, já existem no mercado diversos sistemas de monitorização, produzidos por empresas independentes [7], estando disponíveis desde um nível básico de monitorização até a um nível mais avançado para uso profissional. Porém, com a pesquisa de mercado realizada, verificou-se que para uso profissional estes dispositivos apresentam um custo consideravelmente elevado, e que a maioria destes sistemas, no seu modo de funcionamento *standard*, necessitam da comunicação com o inversor, existindo a possibilidade de adicionar *hardware* extra para casos de incompatibilidade. Ou seja, a maioria destes sistemas são projetados para serem compatíveis com um dado conjunto de inversores, podendo existir a possibilidade de contornar o caso de incompatibilidade com a adição de um outro produto, como por exemplo de contadores elétricos, alternativa esta que por consequência conduz a

um aumento dos custos associados. Os produtos da empresa *Solar Log* são um exemplo prático deste tipo de sistemas, dado que se apresentam como sendo compatíveis com uma vasta gama de inversores, podendo ainda ser complementados com *Smart Meters*.

A principal motivação deste trabalho consiste na criação de um dispositivo de baixo custo capaz de monitorizar um sistema de geração independentemente do inversor instalado, superando assim os elevados preços e algumas características de dependência de produtos similares existentes.

1.1 OBJETIVOS

No âmbito desta dissertação, é pretendido o desenvolvimento da prova de conceito de um sistema de monitorização de baixo custo que seja independente do fabricante do inversor. Para tal, pretende-se o desenvolvimento de todo o *hardware* necessário, assim como o respetivo *software* de monitorização.

O *hardware* a desenvolver visa a obtenção e tratamento de dados relativos ao sistema de geração, no qual são integrados os sensores necessários à amostragem dos sinais em ambos os lados DC e AC, assim como os respetivos circuitos de acondicionamento de sinal e sinais de alimentação. É ainda pretendido a utilização de um sensor que permita a medição da radiação solar para que seja possível classificar a performance dos módulos fotovoltaicos. Os dados processados pelo microcontrolador são posteriormente guardados numa base de dados. A figura 1.1 apresenta o diagrama de blocos simplificado do *hardware* do sistema.

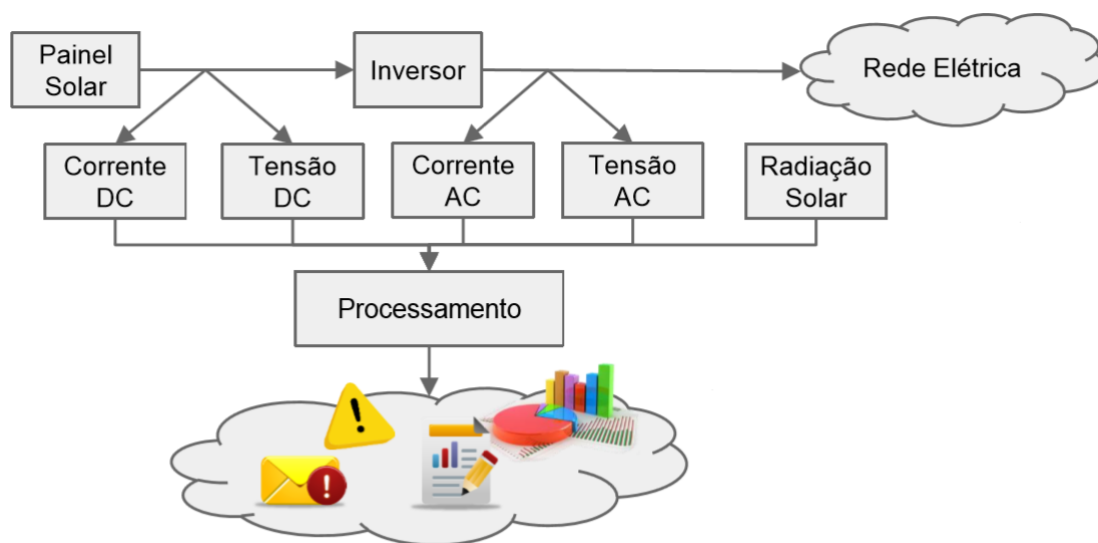


Figura 1.1: Diagrama de blocos do sistema

De forma a permitir ao utilizador o controlo e visualização da monitorização, pretende-se o desenvolvimento de uma plataforma *WEB* orientada para o acesso via computador ou *smartphone*. A qual deve permitir a consulta de históricos da energia (AC e DC), alertas, especificação das definições do dispositivo, geração de relatórios, e ainda a existência de um mecanismo automático para o envio de alertas via *email*.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente documento encontra-se organizado nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: Nesta secção procura-se analisar o estado atual da tecnologia de monitorização. Na qual são introduzidos os conceitos básicos relativos à estrutura de geração de energia solar, sistemas de monitorização, e respetiva análise de mercado. São ainda introduzidas noções relativas aos sensores comuns em sistemas independentes de inversor e principais fundamentos matemáticos.

Capítulo 3: Todo o projeto do sistema é apresentado neste ponto. São descritos em detalhe todos os passos tomados para a conceção do *hardware* e *software* do *logger* solar. O dimensionamento do *hardware*, envolvendo fontes de alimentação, sensores, circuitos de acondicionamento de sinal e outros circuitos integrados, é acompanhado por todos os cálculos envolvidos, sendo todas as escolhas tomadas devidamente justificadas. Por sua vez, o *software*, é de forma idêntica descrito com as devidas justificações.

Capítulo 4: Capítulo onde é analisada a performance do sistema tanto a nível de *hardware* como de *software*. Neste é analisada a performance na leitura dos sinais de corrente, tensão e radiação solar através de métodos estatísticos e da comparação com outros sistemas de medição assim como a validação das funcionalidades da plataforma WEB.

Capítulo 5: Capítulo referente às conclusões do trabalho, no qual são descritos os objetivos atingidos e as dificuldades encontradas. São ainda enunciadas sugestões para a continuação e melhoramento do trabalho aqui desenvolvido.

ESTADO DA ARTE

Os dispositivos de monitorização de estruturas de produção a partir de painéis Fotovoltaicos (FVs), *loggers* solares, permitem a extração de informação e respetivo processamento tendo em vista a realização de uma análise sistemática do sistema em que são instalados. Funcionando como uma ferramenta de *feedback* para o proprietário da estrutura, esta tecnologia envolve várias temáticas desde o ponto de extração de informação até à sua disponibilização para o utilizador. A compreensão do funcionamento do sistema a ser alvo de monitorização, o levantamento das características dos *loggers* já existentes, a análise da natureza dos sinais elétricos envolvidos, e a identificação dos sensores mais utilizados são alguns dos pontos tratados neste capítulo, no qual se pretende apresentar o panorama atual destes sistemas de monitorização.

2.1 O SISTEMA DE GERAÇÃO

Os sistemas de geração FVs constituem um dos meios mais promissores de produção de energia através de fontes renováveis. Assim como outras tecnologias de energia renovável, apresentam-se como uma fonte de energia verde, ajudando a diminuir as emissões de gases para a atmosfera. Uma das suas principais vantagens reside no facto de possibilitarem o fornecimento de energia elétrica em qualquer lugar exposto à luz solar. Com os avanços tecnológicos que se têm verificado durante os últimos anos, esta tecnologia tem se tornado cada vez mais popular com a consequente baixa do seu custo associado. Porém, apesar do decréscimo verificado no seu custo de produção, a tecnologia fotovoltaica continua a ter um custo considerável, sendo uma das suas desvantagens [8]. Outro ponto desfavorável reside na natureza da tensão por si produzida, tensão DC, conduzindo à necessidade da utilização de inversores encarecendo assim a estrutura de geração. A baixa eficiência dos painéis, também não se apresenta como um ponto a seu favor, pois em cerca de 95% das células solares a sua eficiência é cerca de 17%, existindo no entanto em ambiente laboratorial células com uma eficiência na ordem dos 31% [4].

Baseados no efeito fotoelétrico descoberto pelo Francês Edmund Becquerel em 1839, os painéis fotovoltaicos produzem energia elétrica através da luz solar incidente. Os fótons, existentes nos raios solares, ao colidirem com a célula fotovoltaica podem ser refletidos, absorvidos ou atravessar diretamente a superfície libertando energia sob a forma de calor. Quando absorvido, a energia do fóton

é transferida para um elétron de um átomo da célula, constituída por um material semicondutor. Com esta transferência de energia o elétron consegue libertar-se do átomo passando a fazer parte da corrente elétrica do circuito. A célula FV apresenta um campo magnético de forma a gerar a tensão necessária para conduzir a corrente para uma carga externa. A figura 2.1 apresenta a versão simplificada do circuito equivalente das células solares. O qual é constituído por uma fonte de corrente, um díodo e uma resistência parasita, por norma de valor reduzido [4].

Dois parâmetros fundamentais dos módulos fotovoltaicos são a sua tensão de circuito aberto V_{oc} e corrente de curto-circuito I_{sc} , representando os limites de funcionamento do módulo. Através da sua curva que relaciona a resposta em tensão e corrente é possível identificar um ponto de funcionamento ótimo denominado por Maximum Power Point (MPP), no qual, segundo a teoria da transferência de potência máxima, é sinónimo da existência de uma adaptação entre a carga e a resistência imposta pelos módulos FV. De forma a maximizar a eficiência dos módulos, existe a necessidade de colocar os módulos a operar no seu MPP utilizando um mecanismo de Maximum Power Point Tracking (MPPT). O qual, através de um algoritmo de controlo, permite ajustar a tensão à saída dos painéis de forma a fornecer o valor máximo de potência à carga[4].

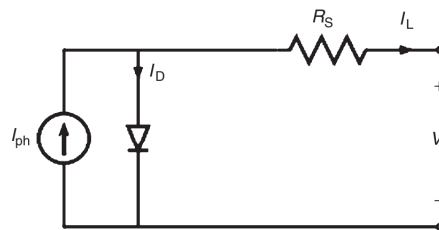


Figura 2.1: Circuito equivalente simplificado de uma célula solar(fonte: [4])

De forma a produzir os níveis de tensão e corrente desejados, as células solares são ligadas em série e em paralelo formando posteriormente um painel solar. Ligações de células em paralelo permitem um aumento da corrente produzida, enquanto que ligações em série permitem um aumento da tensão à saída dos módulos. A figura 2.2 ilustra os vários conjuntos formados e respetivas designações[4].

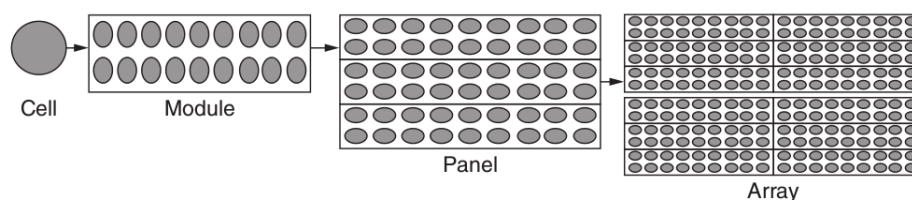


Figura 2.2: Constituição de um *array* de painéis (fonte: [4])

As estruturas de produção de energia elétrica a partir de painéis FV podem ser encontradas em diferentes tipos de tipologias consoante a sua finalidade. O ponto seguinte procura descrever o tipo de instalações tipicamente utilizadas.

2.1.1 INFRAESTRUTURA

Após ser garantido o funcionamento eficiente do *array* de painéis FV, são ainda necessários adicionar elementos ao sistema para realizar o controlo, conversão, distribuição e armazenamento

da energia. Tais elementos dependem obviamente das características do sistema e da sua finalidade, podendo ser necessário o uso de baterias, controladores de carga e de inversores. A figura 2.3 apresenta um diagrama contendo os elementos principais destes sistemas.

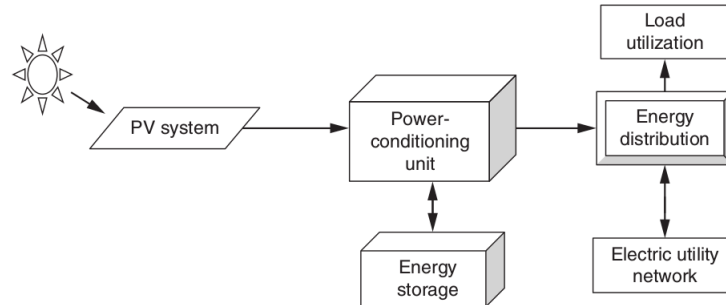


Figura 2.3: Componentes principais de um sistema FV (fonte: [4])

A sua instalação centra-se essencialmente em três tipologias típicas: sistemas autónomos, híbridos e ligados à rede de distribuição de energia elétrica. Os sistemas autónomos (figura 2.4) constituíram o primeiro campo de operação económica da tecnologia fotovoltaica. A aplicação deste tipo de sistemas, revela-se de bastante utilidade, pois permite o fornecimento de energia elétrica em regiões onde não existe cobertura pela rede pública de eletricidade[4].

Devido às diferenças temporais entre produção e a procura de energia nestes sistemas, torna-se obrigatório a acumulação de energia, tipicamente recorrendo a baterias recarregáveis. Em geral, a utilização de acumuladores obriga à utilização de um regulador de carga adequado que faça a gestão do processo de carga, de forma a proteger e garantir uma elevada fiabilidade e um maior tempo de vida útil dos acumuladores[4]. Um diagrama ilustrativo deste tipo de instalações é apresentado na figura 2.4.

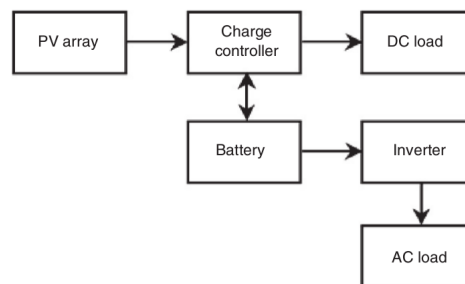


Figura 2.4: Diagrama de sistema FV autónomo (fonte: [4])

Por sua vez, aquando de uma instalação ligada à rede de distribuição de energia, estes sistemas são ligados em paralelo apresentando uma composição semelhante à dos sistemas anteriores, podendo mesmo possuir acumuladores e reguladores de carga. A figura 2.5 apresenta uma configuração típica da sua instalação, na qual é visível a existência de uma unidade MPPT para maximizar a eficiência do *array* FV.

Os inversores, assim como os módulos FV, constituem um dos elementos fundamentais do sistema de geração. Para ter uma maior perceção das características de tensão e corrente existentes na entrada e saída destes dispositivos analisaram-se um conjunto de inversores apropriados para instalações com diferentes potências de instalação numa gama variando entre 245W e 60kW. Na tabela 2.1 são

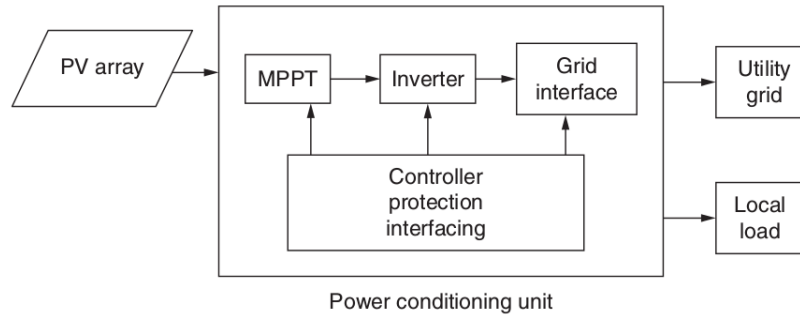


Figura 2.5: Diagrama de sistema FV ligado à rede elétrica (fonte: [4])

	Sunny Boy 240	KAKO 250	Sunny Boy 3000TL	KAKO 5.0TL3	Sunny Tripower 10000TL	KAKO Powador 14.0TL3	Sunny Tripower 25000TL	KAKO Powador 60.0TL3
Potência DC máx.	245W	-	3200W	5200W	10200W	12800W	25550W	60000W
Tensão DC máx.	45V	45V	750V	950V	1000V	950V	1000V	1000V
Corrente DC máx.	8.5V	9A	2 x 15A	2 x 11A	2 x 22A	2 x 18.6A	2 x 33A	3 x 36A
Potência AC nom.	230VA	250VA	3000VA	5000VA	10000VA	12500VA	25000VA	49900VA
Tensão AC nom.	230V	19-37V	180V- 280V	Adaptável	160V- 280V	Adaptável	160V- 280V	Adaptável
Corrente AC nom. máx.	1A	13.2A	16A	3 x 7.25A	16A	3 x 18.1A	36.2A	72.2A

Tabela 2.1: Exemplos de inversores existentes no mercado para várias potências (fontes:[9]–[16])

apresentados 8 desses inversores com as respectivas características de output DC e AC. Na qual é possível verificar a existência de uma tensão máxima à entrada do inversor na ordem dos 1000V, e de um valor de corrente a poder atingir os 72A para uso industrial[9]–[16].

2.1.2 PERFORMANCE DO SISTEMA

A performance do sistema de energia solar depende de vários parâmetros, incluindo a sua localização geográfica, o clima e os diversos mecanismos de perdas. As perdas associadas ao sistema podem ser divididas entre perdas de captura (L_c) e perdas do sistema (L_s). As perdas por captura podem ser causadas pela atenuação da luz incidente, pela dependência com a temperatura ou até por cargas parasitas nos módulos fotovoltaicos. Por sua vez, as perdas do sistema são causadas pela cablagem, inversor, por um MPPT imperfeito e através de perdas de conversão em transformadores[17]. As causas mais importantes para a redução da performance do sistema são a temperatura dos módulos, a sujidade, o desajustamento dos módulos e perdas na cablagem do sistema[17].

As poeiras e a sujidade ao se acumularem na superfície do painel podem bloquear parte da luz incidente levando a uma redução do *output* dos módulos. No entanto, por norma estas poeiras são removidas de forma natural com a chuva. Na presença de longos períodos com ausência de chuva, a diminuição da potência fornecida pelos painéis pode estar relacionada com este fator, sendo portanto um detalhe a ter em conta[17].

A necessidade de converter a energia DC em AC também conduz a perdas no inversor. Contudo,

atualmente os inversores existentes no mercado já são bastante eficientes, apresentando taxas de eficiência na ordem dos 98%[17].

2.1.3 O MERCADO

A tecnologia de painéis fotovoltaicos, já é atualmente considerada uma tecnologia *low-cost* de energia renovável, e será num futuro próximo a fonte mais barata de energia elétrica em varias regiões do mundo [8]. Desde a década de 80 que o preço dos painéis FV tem vindo a diminuir, existindo estudos que se servem do efeito de aprendizagem para caracterizarem a sua evolução[8].

O método de análise utilizado, introduzido inicialmente em 1936 por Theodore Wright como um modelo matemático para o estudo dos custos de produção na área da aviação, permite relacionar a produção cumulativa de um dado produto com os respetivos custos de produção através de um modelo linear em escala logarítmica. A aproximação linear é obtida através da equação 2.1, na qual os valores da abcissa representam a soma cumulativa da produção, sendo por sua vez, os da ordenada o preço de produção de uma unidade para o período correspondente. O parâmetro b é chamado parâmetro de aprendizagem, sendo utilizado para o cálculo da taxa de aprendizagem (LR) e do rácio de progressão (PR) dados pela equação 2.2. Quando aplicado ao preço de um produto, a taxa de aprendizagem é frequentemente tratada por fator preço experiência. A figura 2.6 apresenta exemplos de curvas obtidas com este modelo para taxas de aprendizagem diferentes.

$$C(x_t) = C(x_0) \left(\frac{x_t}{x_0} \right)^{-b} \quad (2.1)$$

$$LR = 1 - 2^b = 1 - PR \quad (2.2)$$

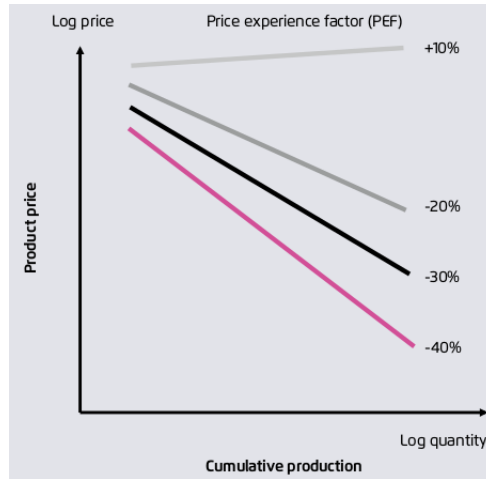


Figura 2.6: Curva de aprendizagem: gráfico do preço do produto em função da experiência (fonte:[8])

Utilizando o método anteriormente descrito, num estudo levado a cabo pela *Agora Energiewend* em conjunto com o *Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems*, é sugerido que a taxa de aprendizagem apresentada no gráfico 2.7 se mantenha a longo prazo, tendo uma taxa média de aprendizagem de 20.9%, sugerindo assim a continuação da diminuição do preço associado aos módulos [8].

Durante as últimas décadas também têm sido realizados grandes progressos ao nível dos inversores. Com a evolução da tecnologia e melhoramentos nas tipologias dos circuitos, estes dispositivos atingiram

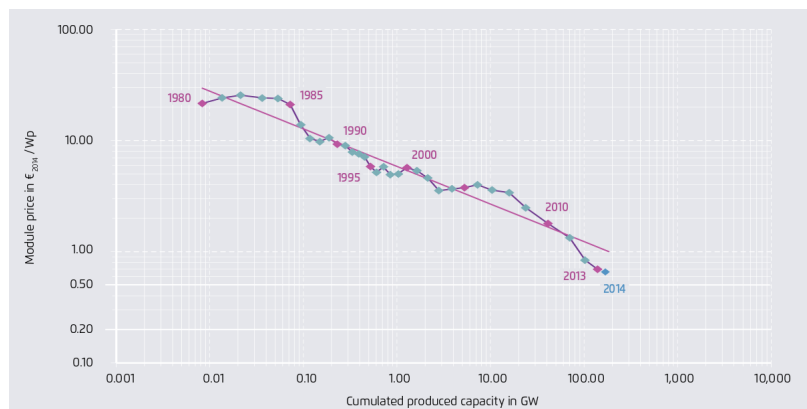


Figura 2.7: Evolução do preço dos painéis fotovoltaicos desde 1980 em função da produção cumulativa (fonte:[8])

um aumento significativo na sua eficiência, proporcionando uma alteração considerável em termos do custo de produção. A figura seguinte apresenta a curva de aprendizagem relativa ao preço de mercado dos inversores, na qual se verifica a existência de uma taxa de aprendizagem de 18.9%[8].



Figura 2.8: Evolução do preço dos inversores a partir dos anos 90 (fonte:[8])

Em suma, as análises relativas à evolução do preço dos componentes principais dos sistemas de geração, inversores e painéis fotovoltaicos, dão boas indicações para que o seu custo de produção continue a baixar nos próximos anos[8].

2.2 MONITORIZAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Durante os últimos 20 anos, em termos de valores médios, o rácio entre a performance real e a teórica de um sistema FV, em climas moderados, sofreu um aumento de 65% para aproximadamente 85%[17]. Este parâmetro, denominado na nomenclatura inglesa por *performance ratio*, apresenta-se como o principal indicativo da qualidade do sistema relacionando o output teórico do sistema com o real[18]. Tal avanço deveu-se essencialmente à monitorização e análise dos dados de vários sistemas

de geração FV em diferentes localizações, conduzindo à identificação de falhas e melhoramento das lacunas encontradas[17].

Um estudo realizado na Alemanha em 1990 para sistemas residenciais de 1 a 5kWp indica a ocorrência de uma falha num período médio de 4.5 anos em cada sistema de geração. Tendo o inversor colecionado 66% das falhas, enquanto que os módulos FV encontraram-se responsáveis por cerca de 15% das anomalias. Sendo evidente a forte probabilidade associada à ocorrência de um comportamento anômalo no sistema. A utilização de um *logger solar* revela-se como uma solução para a identificação imediata deste tipo de problemas [17].

O *logger solar*, constituído por um conjunto de *hardware* e *software*, de forma geral, visa obter dados relativos à produção energética, performance do sistema e a identificação de anomalias no mesmo. A deteção precoce de problemas de funcionamento evita perdas financeiras significativas, sendo mais um dos pontos a favor do uso de sistemas de monitorização [17], [19].

Atualmente os sistemas existentes no mercado já oferecem funcionalidades ao nível da deteção de falhas, análise da performance, criação de históricos, estimativas de ganhos financeiros e geração automática de alertas. Porém, apenas os dispositivos mais caros, possibilitam uma análise completa do sistema, não existindo uma análise da performance em ambos os lados DC e AC nos dispositivos mais baratos.

2.2.1 SISTEMAS DEPENDENTES DO INVERSOR

Um sistema de monitorização dependente do inversor, entende-se como o sistema que necessite de estabelecer uma comunicação com este último para que consiga executar a sua função. Sistemas do género, obtêm os dados relativos às tensões e correntes do sistema a partir do inversor instalado. As soluções de monitorização fornecidas pela empresa *SMA* são um exemplo de soluções dependentes, sendo aqui apresentado o seu produto *sunny webbox* para exemplificar o conceito de *logger* dependente de inversor. Este dispositivo, repleto de funcionalidades, possibilita a monitorização remota e local de todo sistema de geração a partir de um portal WEB. Os dados são disponibilizados ao utilizador sob a forma de gráficos no portal, podendo também ser obtidos através da sua transferência em formato .CSV ou .XML para um servidor FTP especificado. A figura 2.9 serve-se das várias ligações possíveis do *logger SMA webbox* para exemplificar a aplicação de um sistema deste tipo [20].

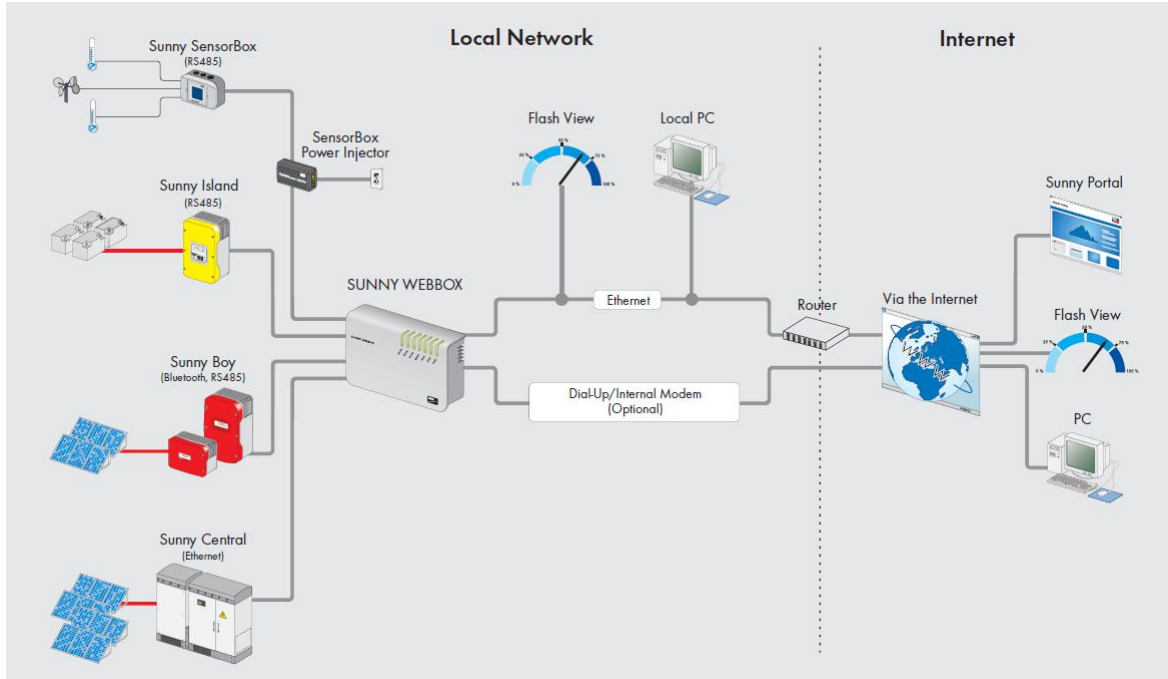


Figura 2.9: Diagrama do sistema SMA web box (fonte:[20])

2.2.2 SISTEMAS INDEPENDENTES DO INVERSOR

Entende-se como *logger* independente de inversor o dispositivo capaz de realizar a monitorização do sistema de produção sem que haja qualquer tipo de dependência com o mesmo, não necessitando de comunicar com o inversor para executar a sua função. De forma a obterem informação relativa ao sistema, estes dispositivos servem-se de *hardware* próprio, contendo um conjunto de sensores para o efeito. Realizando a leitura de informação a partir de contadores de energia, a troca de dados pode ser obtida utilizando protocolos de comunicação adequados (e.g. RS485/RS422) ou através da leitura de um sinal de impulsos luminosos existente em vários *smart meters*[21]–[27].

A tabela 2.10 apresenta o resultado de uma pesquisa de mercado, onde sumaria diversas características de *loggers* fabricados por firmas independentes. Nestas é possível verificar a existência de dispositivos relativamente baratos, como por exemplo o *Intuition-pv* com um custo associado de cerca de 100 euros, porém este apenas realiza uma monitorização básica ao nível da potência aparente gerada do lado AC. *Loggers* que possibilitam a monitorização DC, assim como AC, tendo a capacidade de identificar e fornecer alertas sobre anomalias são naturalmente mais caros, como é o caso dos produtos da *Solar Log* e *Caresolar*. O esquema de instalação deste último é apresentado na figura 2.11, na qual é possível verificar a utilização de sensores de efeito de Hall para possibilitar a amostragem das correntes do lado DC e de contadores elétricos para a análise do lado AC[21]–[27].

Product Comparison		PV-3	Care Solar S	Watson Solar Plus	Chorus PV	Solar Log 300 WIFI	Solar Log 2000	Intuition-pv	OpenEnergyMonitor
Company		Adsen (UK)	Care Solar (GER)	Energno (UK)	Green Energy Options (UK)	Solare Datenysteme (GER)	Solare Datenysteme (GER)	The OML (UK)	(Open-source)
Main Interfaces		Irradiance and CT sensor input Voltage lead input Common Ground	Hall sensors inputs RS232 SO inputs	CT sensors inputs	LED reader and CT sensors inputs	SO-In SO-Out RS485/RS422	RS485, RS422 CAN SO-In SO-Out	CT inputs	AC-AC Voltage adaptor input CT current sensors inputs
General Info									
Data Upload									
Max. Plant Size (kWp)	-	30	-	24	15	2000	-	-	-
Price	1250€	824€	180€	215€	554€	994€	100€	252€	
Inverter-Independent	●	●	●	●	○	○	●	●	●
DC Monitoring	●	●	●	●	●	●	●	●	●
AC Monitoring	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Solar Irradiance Sensor	●	○	○	○	●	●	○	○	○
Temperature Sensor	○	○	○	○	●	●	○	○	●
Wind Sensor	○	○	○	○	●	●	○	○	○
Real Time Data	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Power History	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Yield History	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Wireless display	○	○	○	●	●	●	●	○	●
Remote Appliance Switch	○	○	●	○	○	●	○	○	○
Apparent Power	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Real Power	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Reactive Power	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Local PC Software	●	○	●	●	●	○	○	○	○
Online Monitoring Software	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Smartphone App	○	●	○	●	●	●	●	●	●
Software Alerts	○	●	○	●	●	●	○	○	●
Email Alerts	○	●	○	○	●	●	○	○	●
SMS Alerts	○	●	○	○	●	●	○	○	○
PV Failure Alert	○	●	○	○	●	●	○	○	●
Anti-Theft Alarm	○	○	○	○	○	●	○	○	○

Figura 2.10: Comparação de sistemas de monitorização existentes no mercado (fonte: [21]–[27])

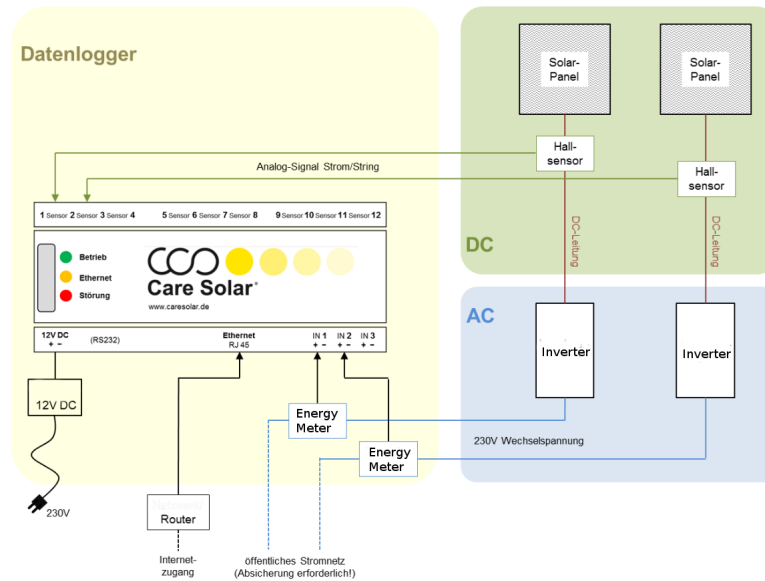


Figura 2.11: Diagrama do sistema *Caresolar* (fonte:[24])

Existem ainda alguns *loggers* produzidos por empresas independentes, que continuam a depender da comunicação com o inversor, porém são compatíveis com uma larga lista de modelos. Para casos de incompatibilidade, alguns destes produtos disponibilizam meios alternativo para solucionar o problema. Os produtos da *Solar Log* são um destes casos, tendo disponíveis contadores elétricos para colmatar a ausência de compatibilidade[27].

2.2.3 STANDARD IEC 61724:1998

O *standard* IEC 61724[28] descreve os pontos principais para a monitorização da performance de um sistema FV. O estabelecimento de normas para a análise destes sistemas foi realizado com o intuito de comparar infraestruturas de produção com diferentes características em diferentes zonas climáticas, de forma a efetuar uma análise que possibilitasse a identificação de vantagens evidentes em certos *designs* ou modos de operação.

Este *standard* internacional recomenda os procedimentos e cuidados a ter em conta para a monitorização dos sistemas FV. A radiação incidente ao nível do plano dos módulos fotovoltaicos, a potência à saída do *array* FV, o *input* e *output* dos acumuladores de carga, tensão e corrente entregues à rede, e a troca e análise dos dados gerados constituem os principais pontos por este abordados[28].

A tabela 2.2 apresenta uma lista dos parâmetros a serem monitorizados em tempo real, organizados nas seguintes categorias: meteorologia, *array* FV, energia de armazenamento, carga, rede de distribuição elétrica e fontes de energia alternativas. O cálculo de outras variáveis importantes pode ser realizado através de software utilizando as variáveis listadas na tabela 2.2. Obviamente que a monitorização das grandezas presentes na tabela depende, claramente, do tipo de sistema de geração e dos seus elementos[28]. A tabela 2.3 lista a taxa de erro máxima permitida segundo esta norma para cada um dos parâmetros de monitorização.

Relativamente ao *sampling* de dados, também são especificadas metodologias a seguir, sendo necessário a utilização de um sistema automático destinado para o efeito. A aquisição de dados referente a variáveis sensíveis à radiação solar deve ser realizada com um período máximo de 1 minuto.

Parameter	Symbol	Unit
Meteorology		
Total irradiance, in the plane of the array ^a	G_I	W m^{-2}
Ambient air temperature in a radiation shield	T_{am}	$^{\circ}\text{C}$
Wind speed ^b	S_W	m s^{-1}
Photovoltaic array		
Output voltage	V_A	V
Output current	I_A	A
Output power	P_A	kW
Module temperature	T_m	$^{\circ}\text{C}$
Tracker tilt angle ^e	ϕ_T	degrees
Tracker azimuth angle ^e	ϕ_A	degrees
Energy storage ^c		
Operating voltage	V_S	V
Current to storage ^d	I_{TS}	A
Current from storage ^d	I_{FS}	A
Power to storage ^d	P_{TS}	kW
Power from storage ^d	P_{FS}	kW
Load ^c		
Load voltage	V_L	V
Load current	I_L	A
Load power ^f	P_L	kW
Utility grid ^c		
Utility voltage	V_U	V
Current to utility grid ^d	I_{TU}	A
Current from utility grid ^d	I_{FU}	A
Power to utility grid ^{d, f}	P_{TU}	kW
Power from utility grid ^{d, f}	P_{FU}	kW
Back-up sources ^c		
Output voltage	V_{BU}	V
Output current	I_{BU}	A
Output power	P_{BU}	kW

Tabela 2.2: Tabela de parâmetros a serem monitorizados em tempo real segundo a norma IEC 61724 (fonte:[28])

Parâmetro	Observações	Erro
Radiação Solar	A medição da radiação deve ser realizada utilizando piranômetros ou células de referência devidamente calibradas. A sua instalação deve ser feita no mesmo plano dos painéis.	< 5%
Temperatura Ambiente	A temperatura ambiente deve ser realizada no mesmo local da infraestrutura.	< 1K
Vento	Quando aplicável, a velocidade do vento deve ser medida num sitio alto e localizado na mesma zona da instalação.	< 10%
Temperatura dos Módulos	O sensor deverá ser colocado na superfície interior de um dos módulos.	< 1K
Tensão e Corrente	A tensão e corrente pode ser AC e/ou DC.	< 1%
Potência Eletrifica	A potência elétrica pode ser AC e/ou DC.	<2%

Tabela 2.3: Lista do erro percentual máximo para cada um dos parâmetros (fonte: [28])

Por outro lado, para variáveis com maiores constantes de tempo deve ser arbitrado um período de amostragem entre 1 e 10 minutos. O processamento destes dados deve ser realizado utilizando uma média móvel para períodos múltiplos de 1 hora[28]. O documento apresenta ainda várias fórmulas para o cálculo do balanço energético e performance do sistema a partir dos dados recolhidos com a monitorização. De seguida são apresentadas as fórmulas para alguns destes parâmetros.

O cálculo da energia em kWh é realizado a partir dos dados de potência guardados pelo sistema através da equação 2.3. Esta permite o cálculo da energia em kWh a partir do somatório das amostras,

P_i , durante o período τ com um período de gravação τ_r . O período τ deve ter como unidade a hora[28].

$$E_{i,\tau} = \sum_{i=\tau_0}^{\tau} \tau_r P_i \quad (2.3)$$

Relativamente à eficiência energética na carga, esta é entendida como sendo o rácio entre a energia entregue e o somatório da energia proveniente de todas as fontes durante o período τ , sendo expressa pela equação 2.4.

$$\eta_{LOAD} = \frac{E_{use,\tau}}{E_{in,\tau}} \quad (2.4)$$

O rendimento total do sistema (equação 2.6) pode ser calculado a partir do rendimento dos painéis solares, dado por Y_A , em conjunto com a eficiência da carga (equação 2.4). Na qual Y_A representa o rácio entre a quantidade de energia produzida durante um dia e a potência nominal da instalação P_0 (equação 2.5).

$$Y_A = \tau_r \frac{\sum_{day} P_A}{P_0} \quad (2.5)$$

$$Y_f = Y_A \times \eta_{LOAD} \quad (2.6)$$

Outro parâmetro importante na análise do sistema é a definição de um rendimento de referência. Na norma aqui definida este parâmetro é especificado como sendo o rácio entre a radiação solar incidente no plano dos módulos durante um dia, e pela radiação de referência do módulo $G_{I,ref}$, sendo expresso pela equação 2.7.

$$Y_r = \tau_r \times \frac{\sum_{day} G_I}{G_{I,ref}} \quad (2.7)$$

A utilização de um rendimento de referencia teórico, Y_r , permite o cálculo de perdas associadas com a operação incorreta dos módulos FV. A subtração do rendimento dos módulos pelo rendimento de referência exprime as perdas por capturas existentes nos mesmos, sendo expressa pela equação 2.8 [28].

$$L_c = Y_r - Y_A \quad (2.8)$$

Por último, o rácio de performance R_p ao relacionar a energia efetivamente produzida com a teoricamente esperada, equação 2.9, indica o efeito global das perdas no sistema de produção. Estas perdas surgem devido à temperatura dos módulos, utilização incompleta da radiação, anomalias do sistema ou até de problemas no dispositivo de MPPT[28].

$$R_p = Y_f / Y_r \quad (2.9)$$

2.2.4 O MERCADO

Durante os últimos anos tem existido uma forte aposta por parte das empresas no mercado da monitorização FV conduzindo a um aumento da competitividade neste sector. A necessidade da existência de empresas independentes surgiu com a grande variedade dos padrões utilizados na construção dos inversores em todo o mundo. Segundo um relatório levado a cabo pela *GTMResearch*,

as firmas *meteocontrol*, *Solar Log* e *Skytron Energy* apresentam-se como as maiores da Europa neste sector[29].

A figura seguinte apresenta um estudo realizado tendo em conta três tipos distintos de companhias: fabricante do inversor, fabricante independente e fornecedor da rede elétrica. Nesta, é possível observar que a empresa *SMA*, empresa fabricante de inversores, é de todas a que possuía mais giga-watts a serem monitorizados a 31/12/13, porém também é visível a forte aposta de que os sistemas desenvolvidos por empresas independentes como a *solar-log*, *meteocontrol* e *Laplace System* têm sido alvo, sendo esta última a que mais giga-watts conseguiu monitorizar durante o ano de 2013. A existência de um maior número de fabricantes independentes relativamente ao número de fabricantes de inversores também é um dos dados a observar [29].

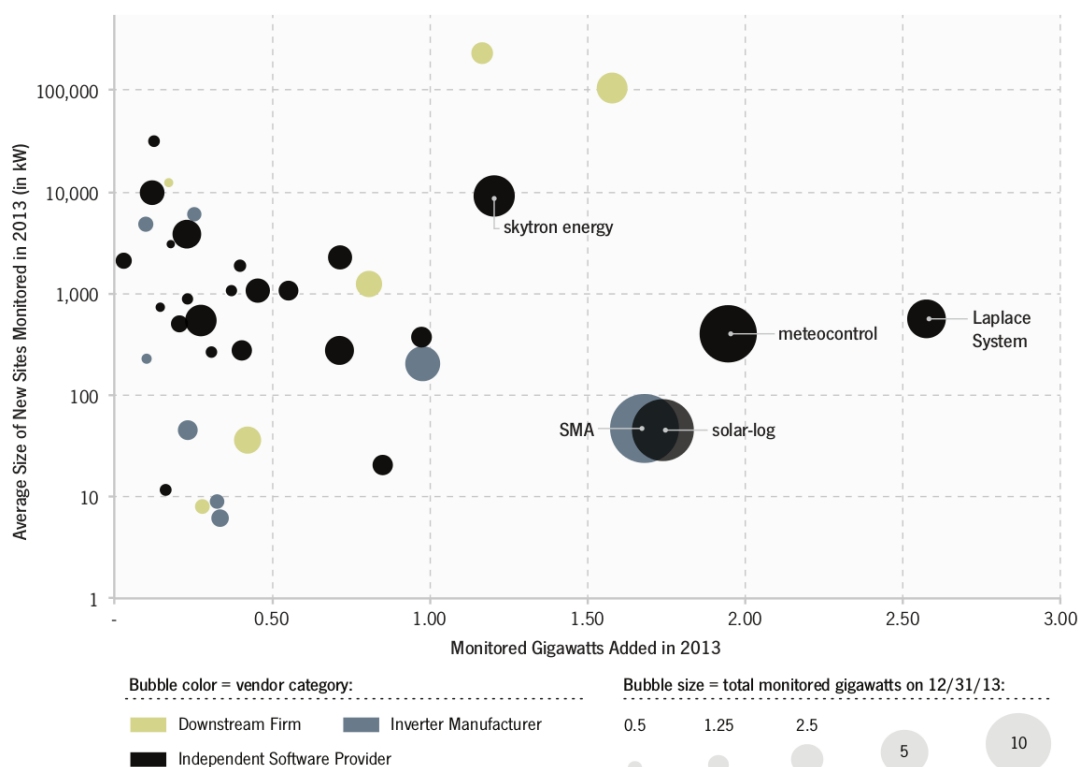


Figura 2.12: Análise competitiva do mercado de monitorização fotovoltaica (fonte:[7])

O investimento associado à instalação de sistemas de monitorização situa-se em média em torno dos 2% relativamente ao custo total da infraestrutura de produção, sendo esta taxa um pouco mais elevada para sistemas residências e mais baixa para industriais[29]. Obviamente que o preço associado a um sistema de monitorização é diretamente dependente das suas funcionalidades e capacidade em termos de potência que consegue monitorizar. A tabela 2.10 apresenta a análise de 8 aparelhos existentes no mercado. Nestas é possível observar a existência de várias funcionalidades relativas à informação obtida e respetiva disponibilização para o utilizador. Permitindo realizar a monitorização energética com maior ou menor rigor dependendo das suas características. Existindo, em alguns casos, sensores para medir dados complementares para a identificação de anomalias como a temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar. A disponibilização dos dados, em todos eles, é realizada a partir do terminal do utilizador, estabelecendo comunicação através de *WIFI*, *ethernet*, *USB* ou rede móvel. As funcionalidades de envio de alertas através de *email*, *SMS*, deteção de anomalias e alarme de anti-roubo encontram-se associadas a equipamentos mais dispendiosos.

Observando as características dos produtos sumariados na tabela 2.10 verifica-se que nem todos os *loggers* listados realizam uma monitorização do lado DC do sistema. Sendo que apenas os equipamentos mais caros, possibilitam a monitorização também ao nível dos painéis fotovoltaicos.

Dos equipamentos analisados, é evidente a existência de um grupo de três dispositivos mais baratos com características semelhantes: *Intuition-pv*, *Wattson Solar Plus* e *Chorus PV*. Orientados para uma utilização não-comercial, as características destes sistemas permitem apenas obter informação relativa aos dados de produção do sistema à saída do inversor visando ainda obter informação relativa ao consumo de uma habitação. Tendo portanto o mercado doméstico como principal alvo.

Por sua vez, o equipamento de monitorização *open-source OpenenergyMonitor*, apresenta-se como um equipamento em claro desenvolvimento, tendo recentemente evoluído para uma nova versão contendo uma placa *raspberry Pi*. Custando cerca de 250 euros, este dispositivo relativamente aos anteriores, acrescenta a vantagem de conseguir enviar alertas via *email* e da sua capacidade em medir a potência aparente, real e reativa.

Os restantes equipamentos da *Solar Log* e *Caresolar*, formam um terceiro grupo de equipamentos mais completos, oferecendo uma monitorização muito mais ampla, estando o seu preço num patamar muito superior aos anteriores podendo custar mais de 900 euros.

Por último, o *logger* mais caro apenas possibilita a monitorização ao nível dos módulos FV. Não apresentando características que o tornem mais atrativo que os dispositivos descritos no paragrafo anterior.

Em suma, no mercado atual existem claramente vários dispositivos criados por fabricantes independentes com a capacidade de oferecerem desde uma monitorização básica até um nível mais avançado, contudo, estes últimos, ainda apresentam um preço consideravelmente elevado.

2.3 MÉTODOS DE ANÁLISE E DETECÇÃO DE ANOMALIAS

A presente secção pretende introduzir alguns dos métodos de análise utilizados na monitorização dos sistemas de geração FV. A sua utilização permite, a partir dos dados recolhidos, efetuar uma análise do desempenho do sistema, conduzindo à identificação de anomalias. Sendo de seguida apresentados os métodos *Regression-Based Linear Modelling* e *PVSAT-2*.

2.3.1 REGRESSION-BASED LINEAR MODELLING

O método aqui introduzido, desenvolvido pela IEA PVPS, pretende fornecer uma vigia sobre a performance do sistema e a identificação de anomalias a partir da análise de modelos lineares estabelecidos entre os principais parâmetros do sistema de geração. A figura 2.13 apresenta as relações entre parâmetros exploradas por este método, na qual é possível identificar 6 categorias distintas de relações: *System performance level*, *Module Temperature*, *Array Level Performance*, *Grid Connection*, *Module Temperature-Secondary Effects* e *Array Level - Specific Effects*. Com cada uma destas categorias é possível a identificação de diferentes anomalias, sendo algumas delas descritas nos pontos seguintes.

A análise da performance do sistema é realizada com a linearização dos dados referentes à performance total Y_f e performance de referencia Y_r , sendo esta última calculada a partir da radiação solar medida pelo módulo de referência. A figura 2.14 contém os gráficos das retas de linearização

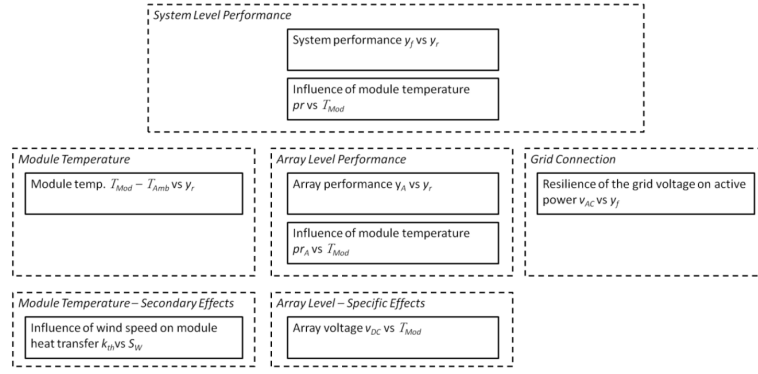


Figura 2.13: Diagrama das relações lineares existentes no sistema FV (fonte:[17])

obtidas com a realização de uma experiência sobre o impacto do crescimento da vegetação ao redor dos painéis na sua performance, tendo-se cortado a vegetação no início da experiência e observado a sua evolução durante 4 semanas. Na figura, são apresentados os modelos lineares calculados semanalmente, com os quais é possível identificar um decréscimo constante do declive das retas de semana para semana, estando diretamente relacionado com o crescimento da vegetação no local de instalação dos painéis. Com esta análise, seria portanto possível a identificação de um problema na performance do sistema[17].

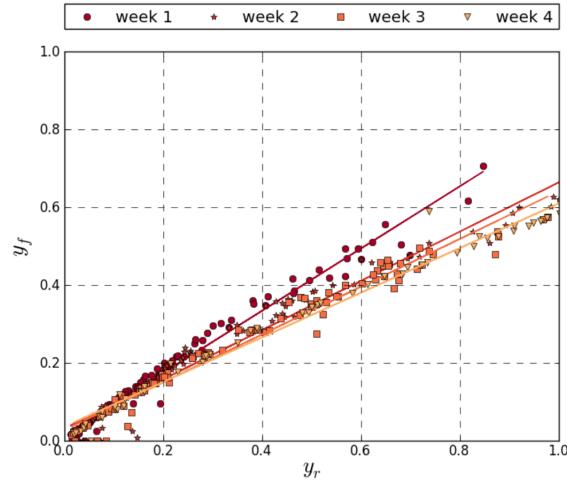


Figura 2.14: Performance de um sistema de geração com o crescimento da vegetação em seu redor FV (fonte:[17])

Outra forma de analisar a performance do sistema baseia-se na linearização dos valores do rácio de performance R_p , dado pela equação 2.9, em função da temperatura dos módulos T_{mod} . A figura 2.15 apresenta os dados do rácio de performance do sistema e da temperatura dos módulos recolhidos por um dispositivo de monitorização durante 4 semanas. No gráfico são introduzidas as retas de linearização para as amostras correspondentes ao período de uma semana para o tempo total monitorizado. Observando a figura, é possível identificar a reta correspondente a um funcionamento normal (*Week 1*), a reta onde ocorreu a anomalia (*Week 2*) e as rectas onde a mesma se prolongou (*Week 3 e 4*). Segundo a fonte, a quebra do rendimento do sistema, em cerca de 33% deveu-se a falhas no inversor durante a segunda semana. De notar que a nomenclatura utilizada na figura para o rácio de performance (pr) representa o parâmetro R_p dado pela equação 2.9[17].

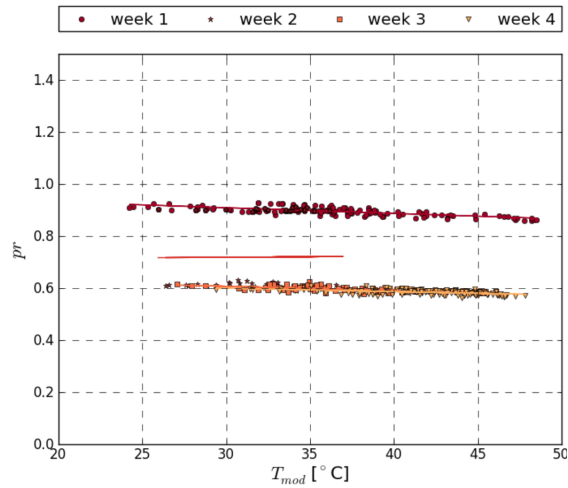


Figura 2.15: Variação do pr em função da temperatura dos módulos FV (fonte:[17])

A análise da tensão DC em função da temperatura dos módulos representa outra abordagem utilizada por este método para a análise da performance dos *arrays* FV. A figura 2.16 apresenta um exemplo da sua aplicação, a qual contém o registo dos valores de tensão DC e temperatura dos módulos acompanhados dos respetivos modelos lineares calculados semanalmente para um período total de 4 semanas. Na qual é visível a dispersão de algumas amostras assumindo valores de tensão mais baixos que o normal. Este comportamento anómalo, após uma visita ao local de instalação, foi identificado pela existência de uma nova construção que estaria a causar um sombreamento parcial sobre os painéis FV. Devido ao facto dos efeitos causados pela sombra do edifício serem relativamente pequenos, estes não seriam facilmente identificados pela análise do performance total do sistema em função da performance de referência. Sendo também, a tensão DC, um dos parâmetros mais importantes a serem monitorizados.

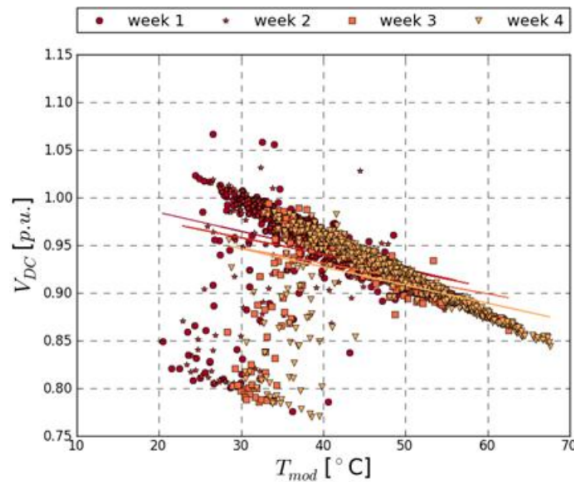


Figura 2.16: Tensão DC normalizada com o valor de tensão MPP em função da temperatura dos módulos FV (fonte:[17])

Em suma, o método permite a caracterização do funcionamento do sistema através da observação da sua operação baseando-se nas relações entre as grandezas físicas mais importantes, ilustradas na figura 2.13, permitindo a identificação de comportamentos anómalos e a sua possível origem[17].

2.3.2 PVSAT-2

O método aqui apresentado visa a identificação de anomalias num sistema de geração FV comparando a potência AC à saída do sistema com a potência AC teórica obtida através de um modelo de simulação[30] envolvendo a radiação solar e um conjunto de características específicas do sistema monitorizado. A sua rotina de deteção de anomalias além de permitir a identificação de falhas indica também a sua causa mais provável.

O procedimento apresenta a particularidade de obter os dados relativos à radiação solar via satélite (Meteosat-8) através do método *Heliosat*, o qual devolve os dados relativos à radiação global (G) e à radiação de difusão (d), sendo utilizados para o cálculo da potência teórica, evitando assim, a instalação de sensores para a captação da radiação solar em cada instalação monitorizada. De notar que a radiação de difusão é extraída da radiação global através de um procedimento desenvolvido por Skartveit et al.[31], o qual permite o cálculo da radiação direta e de difusão a partir da global. As informações necessárias relativas às características do sistema são constituídas pela localização geográfica da instalação, tipo de aplicação (telhado ou terreno), orientação, inclinação e várias características técnicas dos elementos que a constituem (e.g marca dos fabricantes, características do inversor e módulos FV, etc.)[32].

A figura 2.17 apresenta o esquema geral de funcionamento do método. Inicialmente o sistema necessita de ser configurado, sendo enviadas as características da planta de energia solar necessárias. Posteriormente os dados relativos à potência AC, medidos pelo *logger*, solar são enviados via linha telefónica diariamente para o servidor central, seguindo-se a sua análise em função dos dados simulados através de uma rotina de deteção de anomalias, que ao identificar uma falha do sistema procede ao envio de uma mensagem de alerta para o seu operador[32].

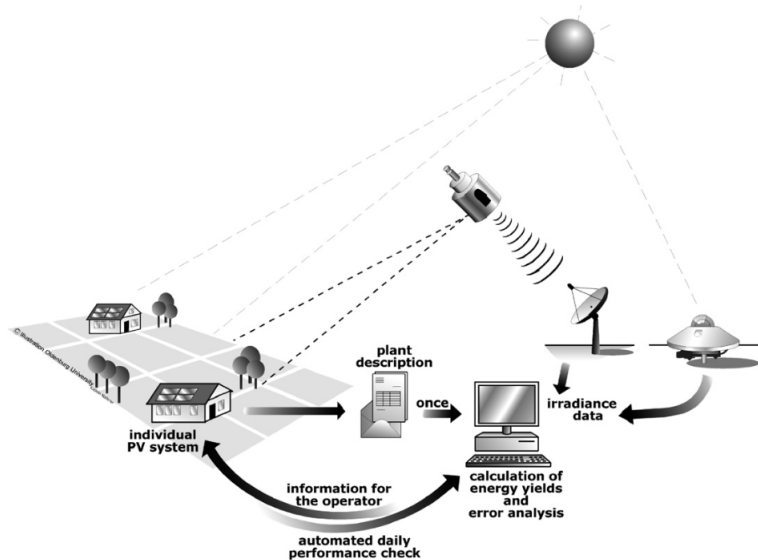


Figura 2.17: Descrição geral do sistema PVSAT-2 (fonte:[32])

A figura 2.18 apresenta um diagrama dos elementos principais e respetivo fluxo das suas entradas e saídas [32].

O cálculo da potência AC esperada é um elemento fundamental deste método, estando a sua qualidade diretamente relacionada com a sua fiabilidade e capacidade de deteção de falhas. Sendo a precisão da radiação medida pelo satélite fortemente dependente do ângulo de elevação do sol e das condições climáticas (i.e. céu limpo ou encoberto), torna necessário a aplicação de um mecanismo

para a correção dos valores de radiação obtidos via satélite. Sendo portanto utilizado o método "kriging-of-differences"(KoD)[30] para efetuar a correção do valor medido. Este método é constituído por três fases: em primeiro lugar é identificada a diferença entre a radiação medida pelo satélite e a medida por uma dada estação meteorológica, definindo-se assim a correção a aplicar aos resultados medidos pelo satélite. Numa segunda fase, a correção anterior é interpolada para a localização do sistema a ser alvo de monitorização. Sendo por último, o valor da correção interpolada adicionado ao valor da radiação medida pelo satélite, compensando assim os valores da radiação global G e de difusão d medidos.

Os dados anteriormente obtidos, são medidos numa plataforma posicionada horizontalmente, sendo necessário realizar um cálculo suplementar para, a partir destes, obter a radiação teórica incidente do plano dos painéis solares tendo em conta o seu ângulo de inclinação e orientação. Para tal é utilizado o modelo *anisotropic-all-sky* formulado por Klucher em 1979 [33]. Posteriormente, é efetuado o cálculo da potência teórica utilizando os dados de radiação estimados no paragrafo anterior, a temperatura ambiente e os parâmetros do sistema fornecidos aquando da sua configuração. De forma a evitar falsos alertas, é ainda calculada uma margem de erro, processo descrito pelos elementos em forma de losango da figura 2.18.

Por último os dados da potência AC teórica e medida, assim como a margem de erro calculada são utilizados pela rotina de identificação de anomalias, sendo posteriormente comunicadas as anomalias identificadas ao operador da planta de energia [32].

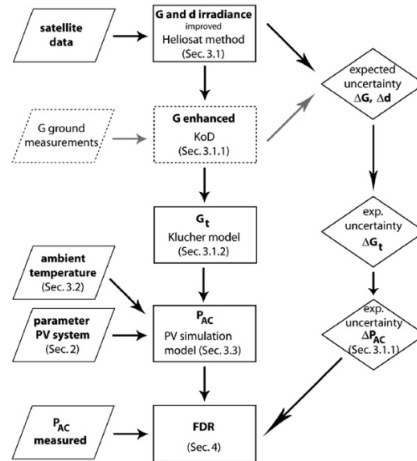


Figura 2.18: Esquema geral do sistema PVSAT-2 (fonte:[32])

A rotina anterior, permite a identificação de três tipos de falhas gerais: perda constante de energia, perdas variáveis e falha completa do sistema. A degradação, sujidade e defeitos dos módulos FV são as causas possíveis identificar para perdas constantes. Por sua vez, as perdas temporárias estão associadas com falhas da rede de energia elétrica, fenómenos de sombreamento, aquecimento do inversor, MPPT ineficiente, entre outros. Por último a falha completa do sistema está associada a defeitos no inversor ou dos dispositivos de controlo[32].

Em suma, o método de monitorização aqui apresentado baseia-se num modelo complexo para a simulação da potência esperada à saída do inversor, servindo-se para isso, dos dados de radiação obtidos via satélite, parâmetros do sistema, temperatura ambiente e de dados de radiação medidos por estações meteorológicas. O método permite assim a poupança de recursos ao nível da instalação de sensores de radiação solar em cada uma das estações, apresentando-se como uma forma centralizada para a realização da monitorização.

2.4 A POTÊNCIA EM CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES

A presente secção visa expor os fundamentos essenciais para o cálculo da potência elétrica, podendo esta ser representada por: potência ativa (Watts), reativa (VAR) e aparente (VA). O conceito de potência reativa surgiu pela diferença verificada entre as quantidades de energia gerada (aparente) e energia consumida (ativa) aquando da sua medição, tendo como principais origens o desfasamento entre a tensão e corrente em cargas não resistivas e devido à distorção harmónica provocada por cargas não lineares[34], [35]. As fontes comutadas apresentam-se como um exemplo de fontes de ruído harmónico, estando presentes em diversos aparelhos [36]. No primeiro caso, a potência reativa é originada pelo ângulo de desfasamento entre a tensão e corrente, sendo o seu cálculo determinado por métodos simples. Porém, relativamente à potência reativa, originada a partir de cargas não lineares, apresenta um cálculo mais complicado, não existindo ainda um consenso no seio da comunidade científica no método a utilizar para sua quantificação [34]. De salientar o facto de que a potência reativa representar energia não útil, existindo atualmente alguns sistemas capazes de a compensar corrigindo o fator de potência [37], [38].

2.4.1 POTÊNCIA EM CARGAS LINEARES

Perante uma carga linear, os sinais sinusoidais da corrente e tensão vem dados respetivamente pelas equações 2.10 e 2.11. Nas quais, V_{RMS} representa a tensão eficaz, I_{RMS} a corrente eficaz, ω a frequência angular, ϕ o ângulo de fase e t o tempo[39], [40].

$$v(t) = \sqrt{2}.V_{RMS}.\sin(\omega_0 t) \quad (2.10)$$

$$i(t) = \sqrt{2}.I_{RMS}.\sin(\omega_0 t - \phi) \quad (2.11)$$

A potência instantânea (equação 2.12) vem dada pela multiplicação destas duas ultimas formulas, originando a expressão 2.13.

$$p(t) = v(t).i(t) \quad (2.12)$$

$$p(t) = 2V_{RMS}.I_{RMS}.\sin(\omega_0 t).\sin(\omega_0 t - \phi) = p_p + p_q \quad (2.13)$$

Utilizando transformações apropriadas, esta última relação pode ser simplificada e expressa pelas equações 2.14 e 2.15, nas quais P e Q representam a potência ativa e reativa, respetivamente.

$$p_p = V_{RMS}.I_{RMS}.\cos(\phi).(1 - \cos(2\omega_0 t)) = P.(1 - \cos(2\omega_0 t)) \quad (2.14)$$

$$p_q = -V_{RMS}.I_{RMS}.\sin(\phi).\sin(2\omega_0 t) = -Q.\sin(2\omega_0 t) \quad (2.15)$$

Sendo estas duas últimas partes da potência expressas pelas equações 2.16 e 2.17 [39], [41].

$$P = V_{RMS}.I_{RMS}\cos(\phi) \quad (2.16)$$

$$Q = V_{RMS}.I_{RMS}\sin(\phi) \quad (2.17)$$

O cálculo da potência ativa pode ser realizado através da média da potência instantânea durante um período do sinal. Esta grandeza é expressa pela equação 2.18, na qual t_0 representa um dado instante temporal e T o período da onda[39].

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t).i(t).dt \quad (2.18)$$

Por sua vez, a potência aparente vem expressa pela multiplicação do valor eficaz da tensão e corrente (equação 2.19). Sendo ainda possível obter o seu valor através da equação equivalente 2.20 [39].

$$S = V_{RMS}.I_{RMS} \quad (2.19)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.20)$$

O fator de potência constitui um dos parâmetros fundamentais para classificar a qualidade da rede elétrica, refletindo o quão eficiente é transferida a energia gerada para a carga, sendo expresso pelo cosseno do ângulo de defasamento entre as ondas de tensão e corrente[39].

$$pf = \cos(\phi) \quad (2.21)$$

2.4.2 POTÊNCIA EM CARGAS NÃO-LINEARES

Os cálculos anteriores apenas são válidos na presença de cargas lineares, sendo necessário realizar outra abordagem mais complexa para o cálculo da potência em cargas não lineares. Perante a não linearidade, a tensão e corrente vem expressa através de series de Fourier, equações 2.22 e 2.23, respetivamente [39].

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} \sqrt{2}V_{K,RMS}\cos(k\omega_0t + \theta_k) \quad (2.22)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} \sqrt{2}I_{K,RMS}\cos(k\omega_0t + \psi_k) \quad (2.23)$$

Nas quais, $V_{K,RMS}$, $I_{K,RMS}$ representam os valores eficazes da tensão e corrente, ψ_k e ϕ_k as fases para os respetivos harmónicos de ordem k . Por sua vez, os valores V_0 e I_0 representam as componentes DC do sinal[39].

A respetiva potência instantânea $p(t)$ (equação 2.12), é para estes sinais expressa pela expressão 2.24 [39].

$$p(t) = P + \sum_{k=1}^{+\infty} P_K \cos(k\omega_0t + \zeta_k) \quad (2.24)$$

Na qual o primeiro parâmetro adicionado, P , representa a potência real, sendo expresso pela equação 2.25 [39].

$$P = V_0.I_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} I_{K,RMS}V_{K,RMS}\cos(\theta_k - \psi_k) \quad (2.25)$$

A potência real pode ainda ser dividida nos seguintes parâmetros: P_0, P_1 e P_H , os quais representam a potência DC, potência ativa do harmónico fundamental e potência harmónica ativa, respetivamente. A equação 2.26 apresenta a relação anterior[39].

$$P = P_0 + P_1 + P_H \quad (2.26)$$

Para o cálculo da potência reactiva as definições de Budeanu [39], [42], IEEE Std 1459-2010[39], [43], Kimbark, Sharon [39] e de Fryze[39], [42] são alguns dos métodos utilizados. Sendo a definição mais comum de energia reativa dada pelo método de Budeanu [39].

A definição de Budeanu propõe que a potência aparente é formada por duas componentes ortogonais: potência ativa (equação 2.25) e potência não ativa. Sendo esta última dividida em potência reativa (equação 2.27) e potência de distorção (equação 2.28).

$$Q_b = \sum_{+ \inf}^{k=1} I_{K,RMS} V_{K,RMS} \sin(\theta_k - \psi_k) \quad (2.27)$$

$$D_b = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_b^2} \quad (2.28)$$

2.5 SENSORES DE CORRENTE

As aplicações de inversores modernas (incluindo sistemas de monitorização) e sistemas sofisticados de controlo existentes exigem uma leitura precisa da corrente eléctrica. Para o efeito podem ser usadas diferentes tipos de estratégias desde a conversão direta da corrente em tensão a partir de um elemento resistivo, ou a sua leitura a partir do campo magnético gerado pela corrente, tendo cada uma delas as suas vantagens e desvantagens [44]. No âmbito da monitorização de sistemas fotovoltaicos os métodos mais utilizados para medir as correntes AC e DC baseiam-se na utilização de transformadores de corrente, sensores de efeito de Hall e na sua conversão direta a partir de elementos resistivos. Os pontos seguintes procuram descrever cada um destes métodos.

2.5.1 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Os transformadores de corrente, também conhecidos por transformadores em formato "donut", baseiam-se no princípio da indução magnética para a realização do *sensing* da corrente alternada, tendo a grande vantagem de apresentarem isolamento galvânico, e ainda, de serem dispositivos de baixo custo. Contudo, devido ao facto de funcionarem através de indução magnética, não possibilitam medir correntes DC[45]. Este facto surge devido à ausência de variação no fluxo do campo magnético para correntes dessa natureza.

Uma propriedade fundamental do magnetismo reside no facto da movimentação de cargas eléctricas provocar um campo magnético, tendo uma direção dependente do sentido de movimentação da carga[46]. A figura 2.19 ilustra o campo criado por uma dada corrente.

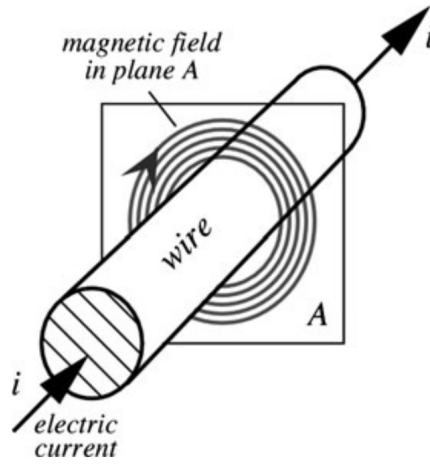


Figura 2.19: Campo magnético na corrente elétrica (fonte:[46])

O fluxo magnético associado ao campo criado pela movimentação da carga vem expresso pela equação 2.29.

$$\phi = \oint B ds \quad (2.29)$$

Por sua vez, a lei de Faraday (equação 2.30), enuncia a existência de uma força eletromotriz devido à variação no fluxo magnético, sendo responsável pelo fenômeno de indução existente nos transformadores de corrente [47].

$$EMF = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.30)$$

O transformador de corrente, sendo constituído por um núcleo toroidal, com um material de elevada permeabilidade magnética (figura 2.20), e por um enrolamento secundário, ao ser introduzido no seu interior um condutor portador de uma corrente alternada é aplicada uma força eletromotriz nos terminais do sensor expressa pela lei de Faraday devido à variação do seu fluxo magnético[45].

Sendo o secundário do sensor constituído por N espiras, a sua corrente, I_s , será N vezes inferior relativamente à corrente I_p (equação 2.31) [45].

$$I_s = \frac{I_p}{N} \quad (2.31)$$

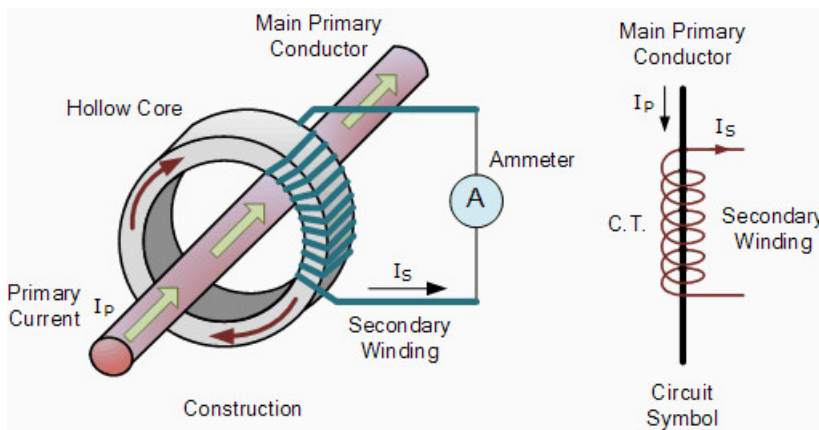


Figura 2.20: Transformador de corrente (fonte:[48])

Posteriormente o secundário é ligado a uma resistência de baixo valor denominada por *burden resistor*. A qual permite a limitação do valor da tensão no secundário. Sendo o seu valor devidamente estipulado pelos fabricantes de forma a maximizar a precisão do sensor[45].

É importante ainda referir o cuidado necessário a ter aquando da sua utilização. O secundário de um transformador de corrente nunca deve ser deixado em aberto sempre que existir uma corrente no seu primário, dado que, quando em aberto, existem variações muito rápidas do campo magnético, que consequentemente, conduzem à existência de tensões muito elevadas nos seus terminais, sendo uma situação altamente perigosa[45].

2.5.2 SENSORES DE CORRENTE BASEADOS NO EFEITO DE HALL

Os sensores de corrente baseados no efeito de Hall são uma das soluções mais utilizadas para o *sensing* da corrente, quer alternada, quer contínua. Apresentando ainda a vantagem de possuírem isolamento galvânico e de existirem várias versões disponibilizando a sua saída em corrente, tensão e no domínio digital [44], [45]. De seguida são descritos os processos físicos envolvidos no seu funcionamento.

O efeito de Hall, descoberto por Dr. Edwin Hall em 1879, nos dias de hoje é amplamente utilizado como uma ferramenta para o estudo da condução elétrica, deteção de campos magnéticos, e até em aplicações de posicionamento e movimento de objetos. Este efeito baseia-se na interação entre o movimento de cargas elétricas e de um campo magnético externo. Quando o eletrão atravessa o campo magnético aplicado, é exercida uma força sobre o seu movimento dada pela equação 2.32, designada por força de Lorentz[49]. Na qual q representa a carga eletrónica em coulomb (C), \vec{v} a velocidade do eletrão, e \vec{B} o campo magnético. As variáveis anteriores apresentam-se em notação vetorial, demonstrando assim, que a direção e magnitude da força \vec{F} está dependente da relação espacial entre o campo magnético e a direção de movimentação do eletrão[46].

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.32)$$

Para descrever o processo vamos assumir que o eletrão se desloca num condutor espalmado que é colocado num campo magnético \vec{B} como é ilustrado na figura 2.21.

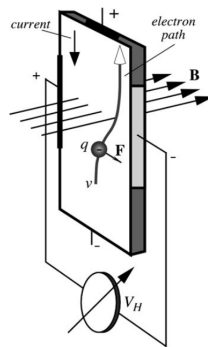


Figura 2.21: Princípio do efeito de Hall (fonte:[46])

O condutor, além dos contactos utilizados para a condução da corrente, apresenta ainda mais dois laterais, a partir dos quais é possível medir uma determinada tensão. Devido ao campo magnético aplicado, a força \vec{F} provoca uma deflexão no movimento dos elétrons para o lado direito do condutor, originando assim uma diferença de potencial devido à concentração de cargas negativas do mesmo

lado. Sendo, posteriormente possível a medição de uma tensão nos terminais laterais denominada por diferença de potencial transversal de Hall V_H . A magnitude e sinal de V_H dependem da magnitude e direção da corrente e campo magnético, sendo ainda proporcional com o seu produto externo (equação 2.34). O seu valor, para uma temperatura fixa, pode ser calculado a partir da equação 2.33, na qual h representa o coeficiente de sensibilidade (dependente da temperatura, formato e tipo de material do condutor) e α o ângulo entre o vetor do campo magnético B e o condutor (figura 2.22 (a)). A figura 2.22 (b) apresenta o símbolo elétrico do sensor.

$$V_H = h i B \sin(\alpha) \quad (2.33)$$

$$V_H \propto I \times B \quad (2.34)$$

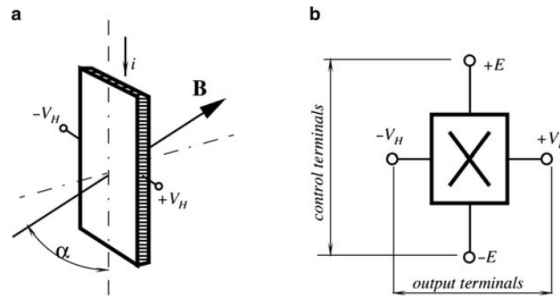


Figura 2.22: Ângulo entre condutor e campo magnético no sensor de Hall (a); Símbolo elétrico do sensor de Hall (b) (fonte:[46])

Nos sensores de corrente, o sensor de efeito de Hall desempenha a função de sensor de campo magnético. A figura 2.23 apresenta o esquema básico da sua aplicação. Devido ao facto de o campo magnético poder ser positivo ou negativo, a saída do amplificador poderá, da mesma forma, assumir valores negativos e positivos sendo necessário a utilização de fontes de alimentação simétricas. Esta necessidade pode ser evitada com a aplicação de uma tensão de *offset* no amplificador diferencial. Podendo ser encontrados estes dois tipos de abordagens nos sensores existentes no mercado.

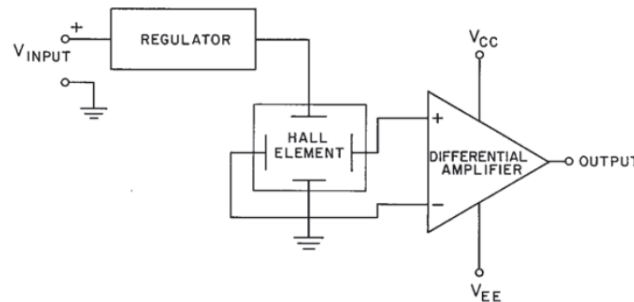


Figura 2.23: Esquema básico de sensor de Hall com saída linear (fonte:[49])

Os sensores de corrente lineares são um dos exemplos existentes, sendo construídos a partir de um núcleo de ferrite (ou silicone) e através de um sensor de Hall. A figura 2.24 apresenta um destes produtos num formato *through-hole*. Estes sensores monitorizam a intensidade do campo magnético criado pela passagem de uma dada corrente. A corrente a ser alvo de medição passa pelo interior do concentrador de fluxo com o fim de concentrar o campo magnético criado pela mesma no sensor de

efeito de Hall. Posteriormente, devido à atuação do campo magnético gerado, é colocada na saída do sensor uma onda de tensão correspondente à corrente AC ou DC medida. Sendo posteriormente necessário converter esta tensão no valor de corrente tendo em conta a tensão de *offset* imposta e a sensibilidade do sensor.



Figura 2.24: Sensor linear de corrente típico (fonte:[49])

Quando utilizados no seu formato *through-hole*, estes sensores são eletricamente isolados, evitando que sejam danificados por correntes demasiado elevadas ou por picos de tensão[49]. Além dos sensores de corrente lineares, os sensores de corrente de efeito de Hall também podem ser encontrados numa configuração em malha fechada, a qual proporciona uma maior precisão e linearidade[45]. Alguns destes sensores, com um formato semelhante aos da figura 2.24, apresentam a particularidade de terem uma parte móvel no seu núcleo, possibilitando a introdução do fio no seu interior sem que seja necessário desconectá-lo do respetivo circuito.

2.5.3 RESISTÊNCIA *shunt*

A resistência apresenta-se como o meio mais simples de converter a corrente em tensão através da lei Ohm 2.35. Designadas por *Shunt Resistors*, as resistências utilizadas como um meio de converter a corrente em tensão tendo em vista a sua medição, são colocadas em série com o circuito, produzindo nos seus terminais uma tensão proporcional à corrente naquele ramo. Este tipo de sensores revelam tanto uma boa resposta em frequência como em DC. Embora sendo um dos meios mais simples para obter uma leitura da corrente, estas não fornecem qualquer tipo de isolamento e ainda apresentam a particularidade de dissiparem potência sob a forma de calor, podendo esta ser considerável para correntes elevadas. O aumento da sua temperatura provoca alterações na sua resistência conduzindo a erros de leitura [45]. A sua aplicação é complementada com a utilização de amplificadores próprios para a monitorização da corrente [50].

$$v = R.i \quad (2.35)$$

A sua aplicação pode ser implementada de duas formas tendo cada uma delas as suas vantagens e desvantagens. Ao inserir esta resistência entre a carga e a terra, o seu circuito de acondicionamento de

sinal é mais simples e barato, podendo no entanto introduzir ruído no sistema proveniente da terra. Outra possibilidade é a colocação desta resistência entre a fonte de alimentação e a carga. Esta solução elimina o ruído anteriormente descrito, possibilitando ainda a detecção de anomalias[50].

2.6 SENSORES DE TENSÃO

Em sistemas de monitorização FV, a aquisição dos valores de tensão AC e DC pode ser realizada recorrendo a diferentes técnicas. Devido ao elevado potencial existente em ambos os lados do inversor, é conveniente recorrer a soluções que ofereçam isolamento. A utilização de transformadores, sensores de efeito de Hall e de divisores resistivos em conjunto com amplificadores de isolamento são algumas das soluções encontradas no mercado, sendo descritas nos pontos seguintes.

2.6.1 TRANSFORMADORES

Os transformadores aqui apresentados, baseiam-se no mesmo princípio de funcionamento descrito anteriormente para os transformadores de corrente. A sua utilização apresenta a vantagem de fornecer um isolamento galvânico e serem dispositivos relativamente baratos. Contudo, quando comparados com outras soluções, apresentam-se como componentes demasiado volumosos e pesados.

Ao ser aplicada uma tensão alternada no seu enrolamento primário v_1 , é criada uma corrente da mesma natureza no mesmo. Consequentemente, surge no enrolamento secundário uma tensão v_2 , cujo valor pode ser calculado através da equação 2.36, em função do número de espiras, N_1 e N_2 [47].

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.36)$$

Um exemplo da sua aplicação pode ser observado no sistema de monitorização FV da comunidade *open energy monitor*, no qual é utilizado um transformador de 230V-9V seguido de um divisor resistivo e da aplicação de uma tensão de *offset* de forma a ir de encontro aos requisitos da ADC. A figura 2.36 ilustra o seu circuito elétrico.

Os mesmos cuidados relativos às possíveis tensões elevadas nos terminais do secundário aquando da existência de um sinal no primário do transformador enunciados para os transformadores de corrente, são de igual forma aplicados para os transformadores aqui descritos.

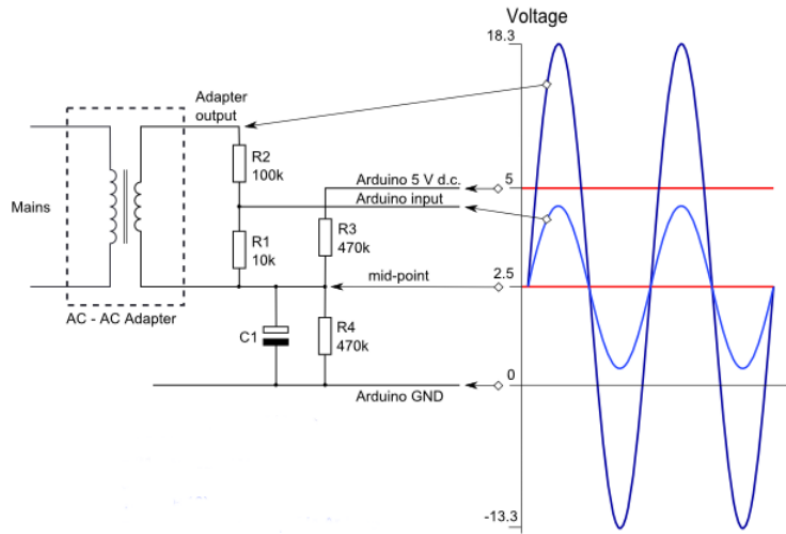


Figura 2.25: Amostragem da tensão AC com transformador e divisor resistivo (fonte:openenergymonitor.org)

2.6.2 DIVISORES RESISTIVOS

A utilização de divisores resistivos no processo de medição de sinais de tensão (AC e DC) também constitui um dos meios bastante utilizados. Estes circuitos podem ser complementados com amplificadores de isolamento, como é o caso do ACPL-790B[51], oferecendo assim isolação entre o circuito a ser alvo de medição e o circuito eletrónico. É no entanto necessário respeitar a resistência máxima a colocar na entrada destes amplificadores de forma a não alterar o seu desempenho. Esta alternativa revela-se bastante atrativa devido ao seu volume reduzido, tendo a sua precisão e preço dependente da qualidade do amplificador utilizado [52].

2.6.3 SENSOR DE EFEITO DE HALL

Outra solução encontrada para medir a tensão é a utilização de dispositivos recorrendo ao efeito de Hall, descrito anteriormente na secção dos sensores de corrente. A figura 2.26 apresenta o esquema ilustrativo do sensor EM010 da empresa ABB.

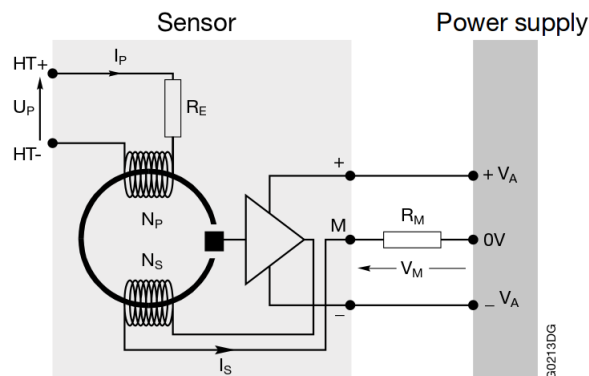


Figura 2.26: EM010 sensor (fonte:[53])

A tensão a ser medida, U_p , é aplicada aos terminais do enrolamento primário do sensor, que consequentemente irá provocar a circulação de uma corrente I_p , aplicando assim um campo magnético sobre o sensor de Hall. Posteriormente é utilizada a resistência R_M para converter a saída em corrente do sensor em tensão[53].

2.7 SENSORES DE RADIAÇÃO

A medição da radiação é um processo fundamental para a classificação da performance dos módulos fotovoltaicos. Podendo-se para tal, recorrer ao uso de piranómetros e de células de referência.

Os piranómetros (figura 2.27), baseados num termopar, são largamente utilizados para quantificar a radiação solar. O seu formato, permite receber luz de todas as direcções, possibilitando medir desde a radiação ultravioleta até à infravermelha (0.3nm a $3\mu\text{m}$). Colocando na sua saída uma tensão proporcional à radiação medida. Sendo o valor desta última, obtido dividindo a tensão pela sensibilidade do sensor [17], [54].



Figura 2.27: Piranómetro (fonte:[54])

Por sua vez, as células de referência (figura 2.28), apresentam uma resposta diferente relativamente aos sensores anteriores, possibilitando apenas medir radiação com um comprimento de onda compreendido entre 450nm e 1150nm, não incluindo todo o espectro da radiação solar[17], [54]. A sua saída varia linearmente com a radiação incidente, podendo ser calculada pela equação 2.37. Na qual G_{ref} representa a radiação de referência, $I_{sc,M}$ a corrente de curto-circuito da célula de referência, α_{Isc} o coeficiente de temperatura da célula, T_{cell} a sua temperatura, T_{ref} a temperatura de calibração e $I_{sc,ref}$ a corrente de curto-circuito de referência. Tipicamente os valores para T_{ref} e G_{ref} são de 25°C e 1000 W/m², respetivamente[55].

$$Radiação_{REF} = \frac{I_{sc,M} G_{ref}}{1 + \alpha_{Isc} (T_{cell} - T_{ref}) I_{sc,ref}} \quad (2.37)$$

O facto dos piranómetros permitirem medir todo o espectro da radiação solar indica, que tipo de sensores, seja o mais adequado para medir a radiação. Porém, para a análise da performance dos módulos fotovoltaicos, o uso de células de referência contendo a mesma composição dos módulos FV, permite obter resultados mais precisos. Pelo simples facto de a sua resposta ao espectro da radiação solar ser a mesma[55].

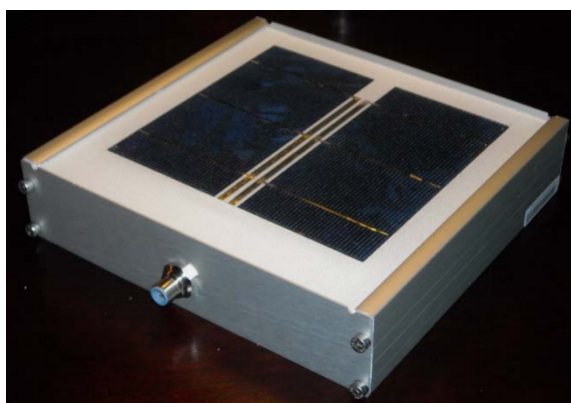


Figura 2.28: Célula solar de referência (fonte:[54])

CAPÍTULO 3

DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Neste capítulo é descrita a implementação do *logger* solar. A escolha dos sensores a utilizar, dimensionamento das fontes de alimentação, circuitos de acondicionamento, assim como a descrição da plataforma web constituem o principal foco desta secção. O sistema de monitorização baseia-se essencialmente em três fases distintas: recolha de dados do sistema, o seu processamento, e a respetiva disponibilização para o utilizador.

A recolha de informação, pressupõe a medição das tensões e correntes, AC e DC, utilizando soluções que ofereçam um bom isolamento. A necessidade de utilizar sensores com isolamento, surge devido ao elevado valor das tensões e correntes a serem monitorizadas. Sendo ainda utilizado um sensor para a captação da radiação solar. Posteriormente, estes dados passam por circuitos de acondicionamento de sinal de forma a preparar a sua conversão para o domínio digital. Obtida a informação, o sistema necessita de tratar os dados através de uma unidade de processamento. A qual, realiza uma interação constante com uma base de dados para os salvar guardar. Por sua vez, o acesso à informação tratada é realizada através de uma plataforma WEB.

O hardware relativo à aquisição da informação, unidade de processamento, base de dados e servidor web constituem os elementos fundamentais deste projeto. As figuras 3.1 e 3.2 ilustram a interação entre estes elementos e o diagrama de blocos geral do sistema, respetivamente.

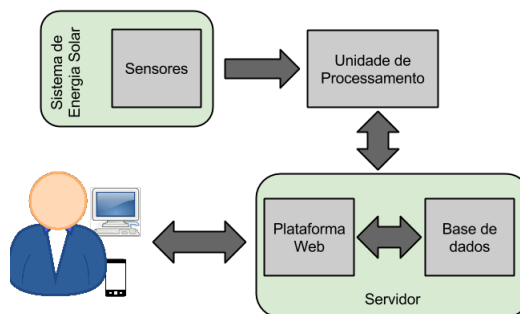


Figura 3.1: Módulos principais do sistema

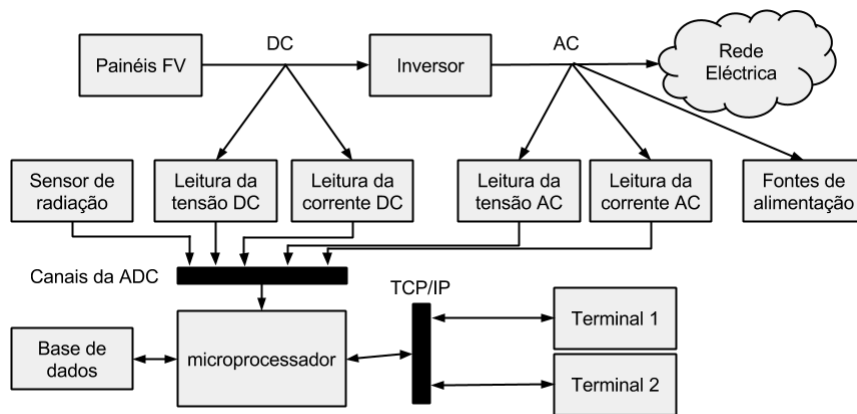


Figura 3.2: Diagrama de blocos geral do sistema

Numa fase inicial, o projeto do hardware, passa pela realização de um levantamento dos requisitos do sistema, onde são definidas as estratégias a seguir para realizar o *sensing* dos sinais relevantes, implementação do *web server*, processamento dos dados e respetivo armazenamento. Além da definição das estratégias escolhidas para colecionar a informação do sistema, é também necessária a implementação dos circuitos de acondicionamento de sinal e a realização de um levantamento quanto aos requisitos energéticos da plataforma. Sendo portanto, em primeiro lugar, especificados os componentes e respetivos requisitos.

3.1 SENSORES E CIRCUITOS DE ACONDICIONAMENTO

O *hardware*, ao nível de sensores, utilizado para a aquisição de dados do sistema de geração, representa o componente principal do *logger* solar independente do inversor, pois é graças à sua operação que se obtém a informação. Ainda de salientar o facto, de que a qualidade da monitorização está fortemente ligada com a robustez deste elemento, sendo evidente que a implementação de um *hardware* mais preciso conduz a uma maior fiabilidade ao nível da monitorização.

3.1.1 SENSORES DE TENSÃO

Os sensores de tensão aqui tratados, são dimensionados com o objetivo de medir tensões para os lados AC e DC na ordem dos 1000V e 276V eficazes, respetivamente. A gama de leitura para o lado DC é definida a partir da pesquisa realizada na secção 2.1.1, enquanto que no caso da tensão AC é definida uma possível variação de 20% em torno da sua tensão nominal (230V). Os níveis de tensão são obtidos utilizando um divisor resistivo em conjunto com um amplificador de isolamento. Esta solução, comparativamente com o uso de transformadores, apresenta a vantagem de ser mais simples e de ocupar um espaço mais reduzido.

A escolha do amplificador de isolamento baseou-se numa pesquisa de mercado, apresentada na tabela 3.1.

	Tipo	Prod.	Vend.	Encaps.	Input	Alimen.	Erro máx.	Isolação máx.	Preço
HCPL-7800A	Acopla. óptico	Avago	Farnell	DIP-8	$\pm 2V$	4.5-5V	$\pm 0.35\%$	891V	€ 12.51
ISO124P	Acopla. óptico	TI	Farnell	DIP-16	$\pm 12V$	$\pm 15V$	$\pm 0.5\%$	2400V	€ 16.40
HCPL-788J-00E	Acopla. óptico	Avago	Farnell	SOP-16	$\pm 2V$	4.5-5V	$\pm 0.4\%$	1230V	€ 7.25
ACPL-790B-300E	Acopla. óptico	Avago	Farnell	DIP-8	$\pm 2V$	4.5-5V	$\pm 0.13\%$	891V	€ 6.87
ISO122JF	Galvânico	TI	Mouser Elect.	PDIP-8	$\pm 10V$	4.5V a $\pm 18V$	$\pm 0.05\%$	2400V	€ 20.12
AMC1100	Galvânico	TI	Mouser Elect.	SOP-8	-0.16V a VDD1	4.5V a 5.5V	1%	1200V	€ 4.56

Tabela 3.1: Lista de amplificadores de isolamento resultante da pesquisa de mercado

A partir da qual se elegeu o produto ACPL-790B-300E da empresa Avago Technologies por apresentar a melhor relação qualidade preço e um encapsulamento DIP-8. Devido às características deste componente, é necessário dimensionar os divisores resistivos de forma a obter uma tensão máxima de 0.3V na sua entrada para evitar fenômenos de saturação [51]. Sendo ainda necessário ter em conta o seu ganho fixo de 8.196 (G1) no dimensionamento dos circuitos de acondicionamento de sinal. Relativamente aos circuitos recomendados para a aplicação deste amplificador, são utilizados os componentes Cs e Rs, assinalados nas figuras 3.4 e 3.6, e ainda um amplificador diferencial devido à natureza diferencial da sua saída.

Nos circuitos de leitura de tensão AC e DC aqui dimensionados, são adicionados condensadores de desacoplamento de sinal em cada circuito integrado, sendo ainda usado um *buffer* em cada saída com o intuito de limitar a tensão à entrada da ADC, nos 3.3V, para estar de acordo com as suas especificações. Devido à utilização destes *buffers*, os ganhos G1 e G2, assinalados nas figuras 3.3 e 3.5, são dimensionados de modo a obter uma tensão máxima em V0 (figuras 3.6 e 3.4) na ordem dos 3.25V, de forma a evitar a perda de informação devido à saturação destes componentes. Em ambos os circuitos são ainda utilizados filtros com a finalidade de filtrar ruído. De seguida são apresentados os cálculos realizados para cada um destes circuitos.

O circuito relativo à leitura da tensão DC é descrito através das figuras 3.3 e 3.4. O divisor resistivo deste circuito é dimensionado, tendo em conta os requisitos de leitura e as características do amplificador de isolamento, através da fórmula 3.1, com a qual se obteve para as resistências R_2 e R_3 os valores especificados na tabela 3.2.

$$V_x = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.1)$$

O ganho G2 deste circuito é calculado através da equação 3.2, tendo-se obtido para R_f e R_1 (figura 3.4), uma resistência de 3556 Ω e 4700 Ω , respetivamente. Devido ao facto da resistência de 3556 Ω não estar disponível, utilizou-se, como alternativa, duas resistências de 3300 Ω e 270 Ω em série (tabela 3.2). É importante ainda referir, que a equação 3.2 resulta de uma simplificação teórica devido às impedâncias em ambos os braços do amplificador serem teoricamente iguais [56]. Por sua vez, o filtro passa-baixo é implementado através do condensador C_f e da resistência R_f , tendo-se usado a expressão 3.3 para calcular o valor da capacidade. Na qual se obteve uma frequência de corte na ordem dos 34Hz, com a utilização de C_f igual a 1 μ F. A frequência de corte anterior, é especificada com o intuito de filtrar ruído.

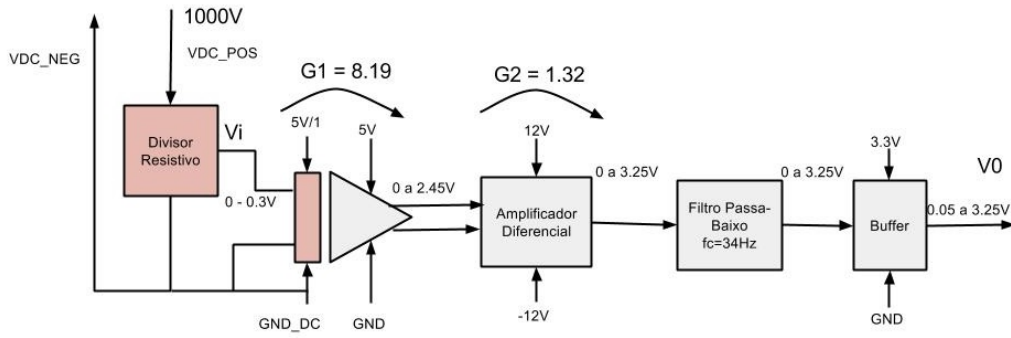


Figura 3.3: Diagrama de blocos para o circuito de leitura da tensão DC

Componente	Valor
R2	3.3MΩ
R3	976Ω
R1	3300Ω+270Ω
Rf	4700Ω
Cf	1μF

Tabela 3.2: Valores calculados para os componentes principais do circuito de leitura da tensão DC

$$V_{out} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \frac{R_f}{R_1} \left[\frac{1}{R_f \cdot C_f \cdot s + 1} \right] \quad (3.2)$$

$$C_f = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot f_c} \quad (3.3)$$

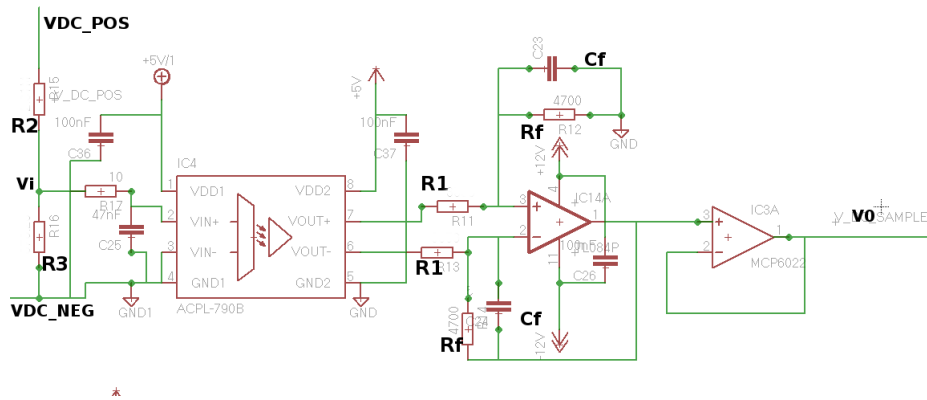


Figura 3.4: Circuito de leitura da tensão DC

Relativamente ao circuito de leitura da tensão AC é realizado um dimensionamento muito idêntico ao ponto anterior, diferindo apenas na necessidade de introduzir um circuito adicional de modo a tornar toda a sua gama de variação positiva, visto que, a gama de leitura da ADC não inclui valores negativos. O seu diagrama de blocos vem ilustrado na figura 3.5.

O problema da existência de valores negativos no sinal pode ser ultrapassado pela adição de uma tensão de *offset* ou pela sua retificação. A retificação do sinal apresenta-se como uma solução muito simples, porém retira amplitude ao sinal, devido à queda de tensão nos díodos utilizados, sendo

posteriormente necessário aplicar um ganho maior a fim de aproveitar toda a gama dinâmica da ADC, o que não é uma boa prática dado que contribui para o aumento do ruído. Por sua vez, a aplicação de uma tensão de *offset* pode ser realizada com o uso de integrados para gerar tensões de referência, divisores resistivos e recorrendo a díodos *zener*. Tendo-se optado pelo uso de díodos *zener*, dada a sua simplicidade de aplicação e o seu custo reduzido.

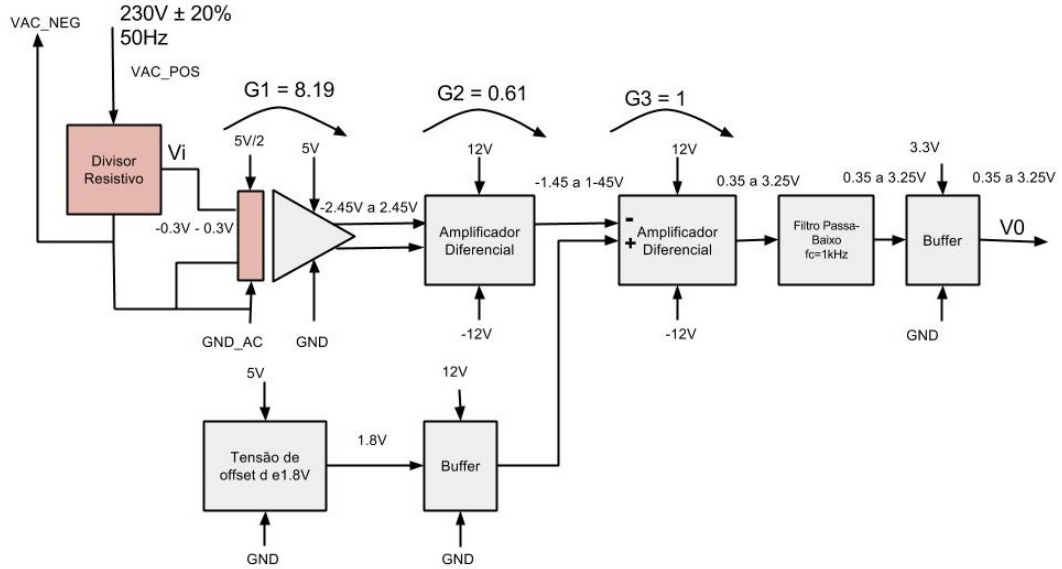


Figura 3.5: Diagrama de blocos do circuito de leitura da tensão AC

O divisor resistivo para a tensão AC é dimensionado utilizando a mesma metodologia seguida para a tensão DC. Tendo-se calculado o valor para as resistências R_1 e R_2 do divisor resistivo a partir da fórmula 3.1, apresentados na tabela 3.3. Antes de se proceder ao cálculo andar de ganho G2, é necessário, primeiramente, especificar a tensão de *offset* a ser utilizada.

De forma a usufruir de toda a gama dinâmica da ADC, a tensão de *offset* a aplicar deve ser igual a metade da tensão máxima permitida pela ADC, o que para a utilizada corresponde a 1.65V. Tendo-se recorrido a um *zener* com uma tensão de polarização inversa de 1.8V. Apesar da tensão imposta pelo diodo ser ligeiramente superior a metade da amplitude da tensão máxima admitida pela ADC, a sua gama dinâmica continua a ser praticamente usada na sua totalidade. É ainda colocado um *buffer* à saída deste circuito com o intuito de ter uma impedância de saída muito baixa, fator bastante importante para garantir o equilíbrio das impedâncias no amplificador diferencial (andar de ganho G3).

A utilização de uma tensão de referência desta grandeza, implica que o valor de amplitude máxima do sinal não seja superior a 1.45V, de forma a que o valor total do sinal com *offset* não exceda os 3.25V. Posteriormente, procedeu-se à implementação do ganho G2 utilizando a equação 3.2, com a qual, se obteve para as resistências da sua configuração, R_f igual a 4700Ω e R_1 na ordem dos 7680Ω . Neste circuito é ainda implementado um filtro passa-baixo, tendo-se usado a expressão 3.3 para calcular o valor de C_f a fim de impor uma frequência de corte de 1kHz, tendo-se obtido o valor indicado na tabela 3.3. O dimensionamento do filtro anterior, visa eliminar ruído e, ao mesmo tempo, possibilitar a medição dos harmónicos existentes na rede. Sendo os de maior importância, pela sua ordem de relevância, o 5° (250Hz), 3° (150Hz) e 7° (350Hz) [57].

Posteriormente, é utilizado um segundo amplificador diferencial para somar a tensão de *offset* de 1.8V ao sinal. Esta última etapa apresenta o inconveniente de inverter a polarização do sinal da tensão AC devendo-se ter em conta a sua correção no software.

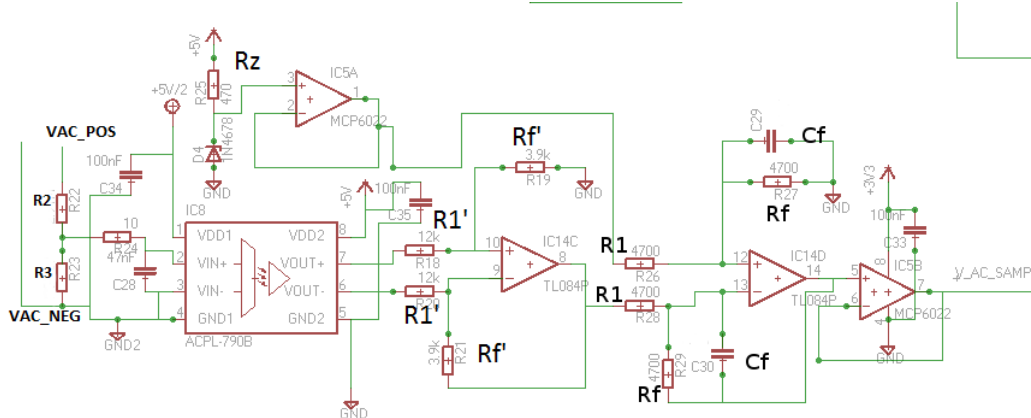


Figura 3.6: Circuito para a leitura da tensão AC

Componente	Valor
R2	3.3M Ω
R3	2.5k Ω
R1	4700 Ω +270 Ω
Rf	4700 Ω
Cf	33nF
R1'	12k Ω
Rf'	3900 Ω
Rz	470 Ω

Tabela 3.3: Valores calculados para os componentes principais do circuito de leitura da tensão AC

Devido ao facto do diodo *zener* de 1.8V não estar disponível no armazém de componentes do departamento, foi necessário substituí-lo por outro com uma tensão de polarização inversa de 2.4V. Consequentemente, esta alteração levou à modificação do andar de ganho diferencial, tendo sido necessário diminuir o anteriormente calculado de 0.612 para 0.331 com a alteração das resistências Rf' e R1', para os valores indicados na tabela 3.3. Esta solução não é de todo a mais indicada, dado que apenas permite o uso de cerca de metade da gama dinâmica da ADC. A utilização de uma fonte de referência acompanhada com um divisor resistivo poderia ser uma alternativa ao circuito implementado para gerar a tensão de referência necessária.

Relativamente aos requisitos de alimentação para os circuitos descritos nesta secção, é necessário a implementação de duas fontes de tensão de 5V para os amplificadores de isolamento (lado de entrada e de saída), duas fontes simétricas de 12V e -12V para o amplificador em configuração diferencial e uma última de 3.3V para os *buffers* colocados na saída de cada circuito.

3.1.2 SENSORES DE CORRENTE

A medição dos valores relativos às correntes em ambos os lados AC e DC constitui um dos pontos principais deste trabalho. O valor máximo da corrente a ser medida, depende obviamente da potência do sistema de geração, podendo atingir valores na ordem dos 72A para sistemas industriais como é referido na secção 2.1.1. No âmbito deste trabalho optou-se pela utilização de um sensor que permitisse a leitura de pelo menos 30A, dado ser um valor razoável, permitindo a leitura de correntes na maioria dos sistemas listados na secção 2.1.1. De forma a seleccionar o sensor mais adequado, realizou-se uma pesquisa de mercado, tendo-se listado na tabela 3.4 os sensores mais relevantes.

	Tipo	Fabri.	Vend.	Input	Alimen.	Erro	AC/DC	Preço
TQL100A	Efeito de Hall	Multicomp	Farnell	$\pm 100A$	$\pm 12V$ a $\pm 15V$	0.3%	✓/✓	€ 20.85
GCBC040	Efeito de Hall	Alps	Mouser elec.	$\pm 40A$	$\pm 5V$	-	✓/✓	€ 8.15
TH30A	Efeito de Hall	Multicomp	Farnell	$\pm 30A$	$\pm 15V$	-	✓/✓	€ 4.78
CSE187L	Transf.	Triad mag.	Mouser elec.	$\pm 30A$	-	-	✓/	€ 2.75
CSLA1CD	Efeito de Hall	Honeywell	Farnell	$\pm 57A$	± 8 a $\pm 16V$	-	✓/✓	€ 14.62
CS60-050L	CT	Coilcraft	Farnell	$\pm 50A$	-	-	✓/	€ 11.32

Tabela 3.4: Lista de sensores de corrente

Com a pesquisa efetuada, encontraram-se várias opções para o efeito, tendo-se destacado o sensor de efeito de Hall TH30A, dado o seu baixo custo, a sua capacidade de medida (30A) e o seu tamanho reduzido. Contudo, o facto de ser necessário colocar o sensor em série com o circuito a medir, torna a conceção da PCB mais complicada devido às correntes elevadas. De forma a contornar este inconveniente, seleccionaram-se sensores que não promovessem o contacto elétrico, tendo-se portanto optado pelos componentes CSLA1CD, para o lado DC, e CS60-050L, para o lado AC. Embora o sensor de efeito de Hall escolhido seja adequado para medir ambas as correntes AC e DC, a escolha do sensor para a corrente alternada incidiu sobre o transformador de corrente CS60-050L dado o seu baixo custo e por não necessitar de sinais de alimentação, facilitando o desenho da PCB.

Em ambos os circuitos aqui dimensionados, são adicionados condensadores de desacoplamento de sinal em cada circuito integrado, sendo ainda usado um *buffer* em cada saída com o intuito de limitar a tensão à entrada da ADC, nos 3.3V, para estar de acordo com as suas especificações.

O circuito relativo à leitura da corrente DC é ilustrado na figura 3.7.

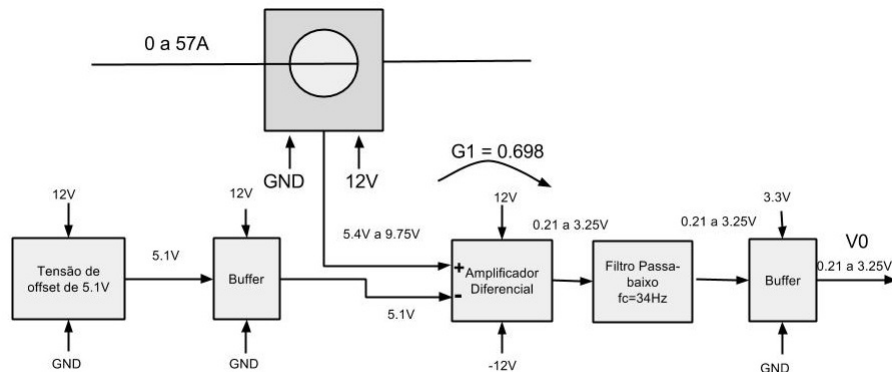


Figura 3.7: Diagrama de blocos do circuito de leitura de corrente DC

O sensor CSLA1DC, apresenta a particularidade de gerar uma tensão de *offset* em cerca de metade do seu valor de alimentação, apresentando uma incerteza de $\pm 10\%$ em torno deste último. Dado que o sensor é utilizado para medir uma corrente com um valor mínimo de 0A, não possuindo valores negativos, é necessário remover a tensão de *offset* imposta, a fim de aproveitar toda a gama dinâmica da ADC. Devido ao facto desta tensão ter uma variação de 10%, optou-se por remover o seu valor mínimo, dado pela equação 3.4, em *hardware*. Sendo posteriormente realizado, uma correção adicional em *software*. A tensão de *offset* a remover é calculada a partir da equação 3.4, que para uma tensão de alimentação de 12V, se obteve um valor de 5.4V.

Componente	Valor
Rz	1.2k Ω
Rl	6.8k Ω
Rf	4.7k Ω
Cf	1 μ F

Tabela 3.5: Valores calculados para os componentes principais do circuito de leitura da corrente DC

A eliminação desta tensão, é realizada utilizando um amplificador diferencial (andar de ganho G1), o qual, aplica uma subtração entre o sinal de saída do sensor e uma tensão de referência. Sendo, esta última, gerada a partir de um diodo *zener* de 5.1V. Entre a tensão gerada pelo diodo e o circuito de amplificação diferencial colocou-se um *buffer* a fim de promover uma impedância de saída baixa, para evitar o desequilíbrio de impedâncias nos braços do amplificador.

Tendo em vista a utilização de toda a capacidade de medida do sensor, 57A, utilizou-se a equação 3.5 para calcular o valor máximo do output do sensor, obtendo-se 9.75V. Na equação 3.5 ϵ representa a sensibilidade, $\Delta\epsilon$ a tolerância da mesma e I_{max} a corrente máxima a ser medida. O ganho necessário a aplicar para realizar a atenuação da amplitude do sinal vem dado pela equação 3.6, na qual $V_{adc}(max)$, representa a tensão máxima admitida na entrada da ADC, tendo-se anteriormente fixado em 3.25V. Utilizando o resultado da equação anterior, na qual se obteve um ganho de 0.698, em conjunto com a equação 3.2, obtiveram-se para R_f e R_1 os valores apresentados na tabela 3.5.

$$V_{sensor(min)} = \frac{V_{cc} \times 0.9}{2} \quad (3.4)$$

$$V_{sensor(max)} = \frac{V_{cc} \times 1.1}{2} + (\epsilon + \Delta\epsilon).I_{max} \quad (3.5)$$

$$G = \frac{V_{adc}(max)}{V_{sensor}(max) - V_{ref}} \quad (3.6)$$

Por sua vez, o dimensionamento do filtro passa-baixo, é realizado com a colocação de um condensador de $1\mu\text{F}$ para C_f . Definindo-se assim uma frequência de corte na ordem dos 34Hz. Sendo este último valor definido para filtrar ruído, apresentando uma frequência de corte reduzida devido ao facto de se tratar da amostragem de um sinal que teoricamente não apresenta oscilações. Os valores calculados são obtidos através da equação 3.3. A figura 3.8 ilustra o circuito implementado.

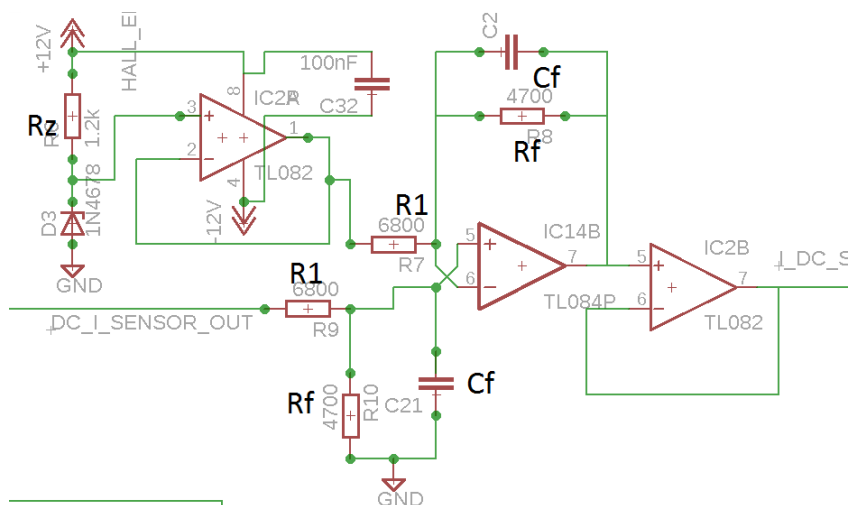


Figura 3.8: Circuito de leitura da corrente DC

A amostragem da corrente AC é realizada recorrendo ao transformador de corrente CS60-050L, estando o respetivo diagrama de blocos da implementação ilustrado na figura 3.10. A fim de converter a corrente gerada pelo sensor em tensão, é colocada aos seus terminais uma resistência de 220Ω como é especificado no respetivo *datasheet*[58]. Observando a figura 3.9, verifica-se que para o valor máximo de corrente especificado para o sensor, 50A, se obtém na saída cerca de 300mV eficazes, o que se traduz numa tensão de pico máxima de 424mV. Apresentando uma sensibilidade de 6mV/A. A partir da tensão de pico máxima, e visando uma tensão máxima à entrada da ADC de 3.25V, conclui-se que a tensão de *offset* a utilizar terá de ser inferior a 2.82V, e obviamente, superior a 0.424V. Tendo-se para o efeito servido de um diodo *zener* com uma tensão inversa de 2.4V, uma resistência de 470Ω e uma tensão de 5V para realizar a respetiva polarização. À saída do circuito, é ainda colocado um *buffer* a fim de garantir uma impedância baixa à entrada da ADC, para evitar que o seu condensador interno tenha uma constante de tempo elevada. O seu circuito é ilustrado na figura 3.11.

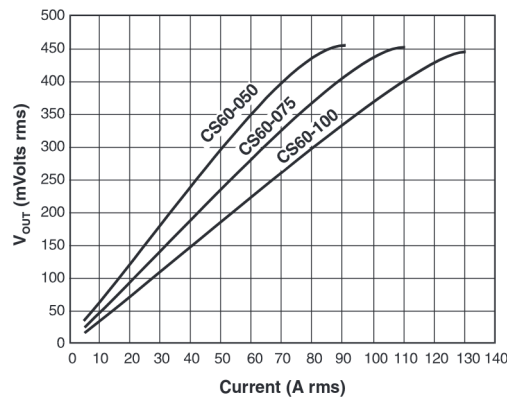


Figura 3.9: Curva de resposta dos sensores da serie CS60 (fonte: [58])

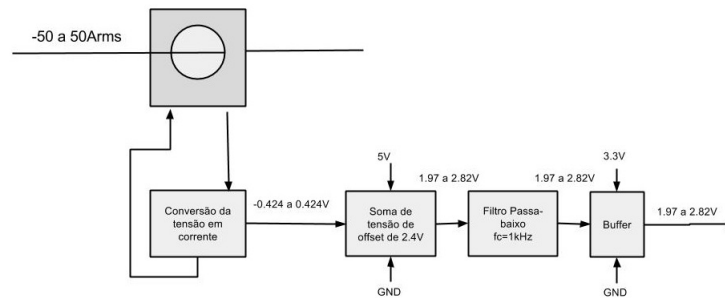


Figura 3.10: Diagrama de blocos do circuito de corrente AC

Assim como no circuito referente à tensão alternada, é também aqui implementado um filtro passa-baixo com uma frequência de corte de 1kHz. O seu dimensionamento foi realizado recorrendo à equação 3.3, tendo-se usado o valor para R1 especificado no *datasheet*[58] do componente e obtido o valor de C1 apresentado na tabela 3.6.

Componente	Valor
Rz	470Ω
R1	220Ω
C1	$680\mu F + 47\mu F$

Tabela 3.6: Valores calculados para os componentes principais do circuito de leitura da corrente AC

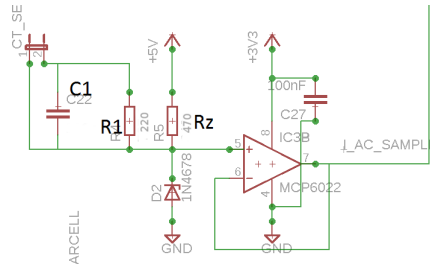


Figura 3.11: Circuito eléctrico do sensor de corrente AC e respectivo circuito de acondicionamento

Relativamente às fontes de alimentação utilizadas pelos circuitos aqui tratados, é necessário a implementação de uma fonte de tensão de 12V, 5V e de 3.3V.

3.1.3 SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR

O sensor de radiação é implementado neste projeto com o intuito de possibilitar a deteção de anomalias no sistema de geração. Sendo que, a utilização de uma célula igual às utilizadas pelos painéis fotovoltaicos torna-se na escolha mais acertada, conduzindo a resultados mais fiáveis dado terem um desempenho muito próximo. Na realização desta prova de conceito utilizou-se o mini painel ilustrado na figura 3.12 a fim de demonstrar o conceito.

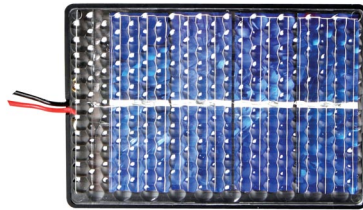


Figura 3.12: Mini painel solar SOL4 Velleman

O circuito da figura 3.13, apresenta o esquema eléctrico implementado, tendo-se utilizado um *buffer* na saída a fim de limitar a tensão à entrada da ADC nos 3.3V. Sendo ainda implementado um divisor resistivo, com a aplicação de *sockets* no lugar das resistências, para que fosse possível dimensionar o divisor resistivo consoante a *output* da célula de referência com o objetivo de definir uma tensão máxima de 3.3V à entrada do *buffer*.

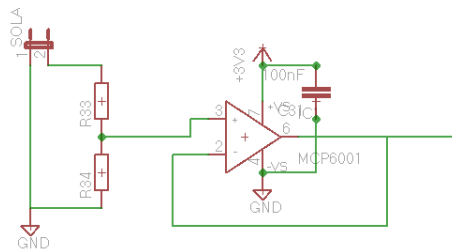


Figura 3.13: Circuito do sensor de radiação solar

3.2 PROCESSAMENTO E SERVIDOR WEB

Na secção anterior procedeu-se ao dimensionamento do hardware responsável pela geração de sinais contendo a informação das 5 grandezas principais do sistema de geração: corrente DC e AC, tensão AC e DC, e por último a radiação. Contudo o facto de ainda serem sinais analógicos não possibilita o processamento da informação, sendo portanto necessário realizar a sua conversão para digital. Após a conversão, é ainda necessário o seu processamento. Sendo que, após o processo anterior, a informação resultante, é armazenada em memória não volátil, estando posteriormente disponível para ser enviada para o utilizador através de um servidor WEB. A abordagem realizada para implementar os processos anteriores, incidiu na utilização da placa de desenvolvimento PIC-WEB da Olimex (figura 3.14), sendo composta por um PIC18F97J60, porta Ethernet, ligação RS232, e disponibilizando ainda o acesso aos vários pinos do microcontrolador. A sua escolha deveu-se ao facto de possibilitar a implementação do *web server* e do processamento num único hardware a um preço relativamente baixo. Sendo o *web server* desenvolvido graças à utilização da *stack* TCP/IP da *microchip*.

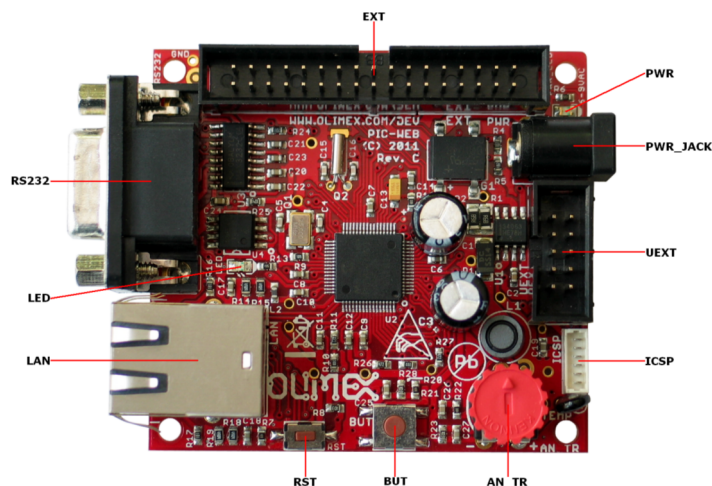


Figura 3.14: Placa de desenvolvimento PIC-WEB

A amostragem dos sinais anteriormente referidos, é realizada utilizando o módulo de conversão analógico-digital de 10 bits incorporado no microprocessador da placa. Procedendo-se posteriormente à salvaguarda dos dados processados num cartão *microsd*. Para possibilitar o seu armazenamento no cartão de memória, recorreu-se ao módulo representado na figura 3.16, o qual, é instalado na PCB desenvolvida através dos sockets designados por SV1 na figura 3.15. A sua comunicação com o microcontrolador, é promovida utilizando o módulo Master Synchronous Serial Port (MSSP) através do protocolo Serial Peripheral Interface (SPI). No meio de comunicação anterior, o cartão de memória comunica como *slave*, sendo, por sua vez, o módulo MSSP da placa o dispositivo master.

Devido à forte necessidade de associar uma referência temporal aos dados amostrados, é necessário adicionar um Real Time Clock (RTC), tendo-se utilizado o integrado DS1307 para o efeito (elemento IC6 da figura 3.15). Dado a sua comunicação ser realizada através de Inter-Integrated Circuit (I²C), e por o único módulo MSSP da placa já ser utilizado para SPI, implementou-se o tipo de comunicação aqui referido via software, tendo-se para tal utilizado os pinos RE1 para a linha de dados e o pino RE0 para o sinal de relógio. É importante ainda referir que a implementação do protocolo via *software*, anteriormente descrito, é realizada recorrendo a funções fornecidas pela Olimex. Relativamente ao circuito, a implementação deste componente, pressupõe a utilização de um cristal de 32.768kHz para

estabelecer o sinal de relógio do próprio integrado, e de uma bateria de 3.3V para alimentar o respetivo componente na ausência da tensão de alimentação.

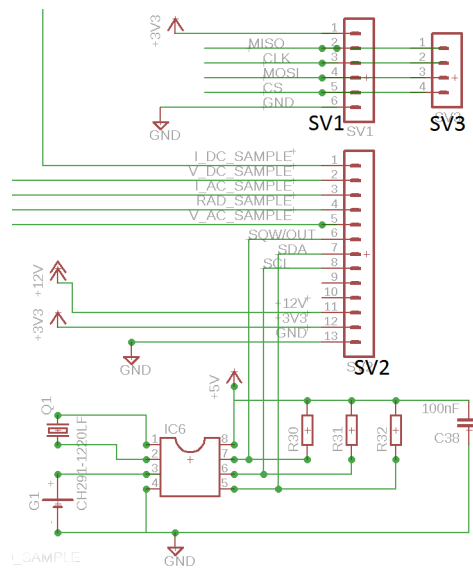


Figura 3.15: Circuito implementado para o cartão de memória e RTC



Figura 3.16: Módulo para cartão de memória

Por sua vez, o estabelecimento de comunicação com o server é realizado via *ethernet*, utilizando as funcionalidades da *stack* TCP/IP da microchip. Relativamente às tensões de alimentação necessárias para implementar os circuitos anteriormente descritos, é indispensável a utilização de uma fonte de 12V para alimentar a placa de desenvolvimento, de uma tensão de 5V para o RTC e, por último, uma tensão de 3.3V para o cartão de memória.

3.3 TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO

No projeto do sistema, devido à necessidade de isolar as tensões e correntes de valor elevado, é necessário a utilização de 2 transformadores como é ilustrado na figura 3.17. Tendo-se portanto, optado pela utilização de um transformador de maiores dimensões para fornecer a alimentação necessária para o circuito eletrónico, e de um transformador de dimensões mais reduzidas, possuindo dois enrolamentos secundários, a fim de gerar as tensões para cada um dos amplificadores de isolamento. Além de ser necessário especificar a grandeza das tensões a implementar com cada transformador, é da mesma forma importante, estimar a corrente máxima a fornecer aos circuitos dependentes de cada transformador,

visando a escolha de transformadores adequados para cada caso. A figura 3.18 apresenta um diagrama com todos os componentes utilizados e respetiva corrente e tensão de alimentação.

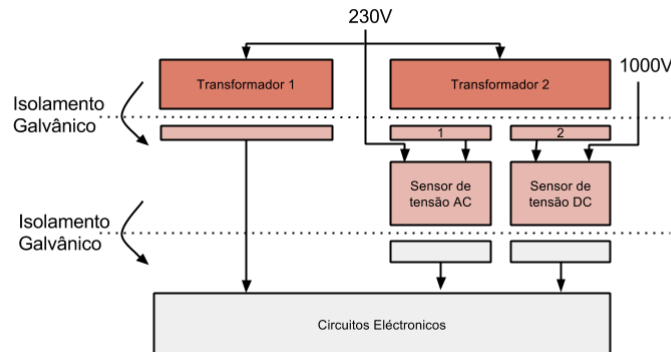


Figura 3.17: Esquema de fontes de alimentação

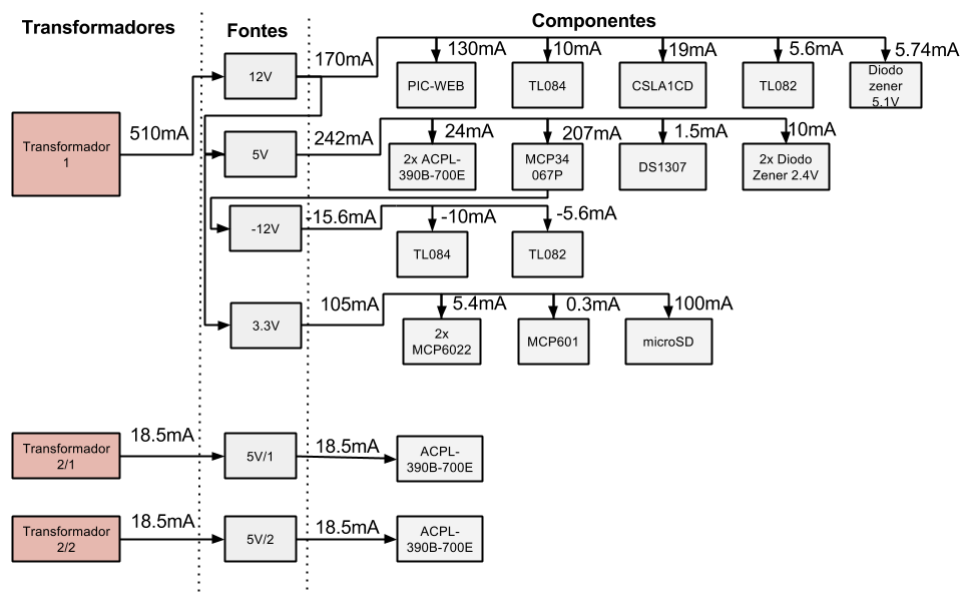


Figura 3.18: Diagrama com os consumos de corrente

Com a qual se conclui a existência de um débito total de 510mA no transformador 1 e 18.5mA em cada um dos secundários do segundo transformador 2.

Após a análise das fontes de tensão existentes no mercado, tendo em conta as características anteriormente descritas, optou-se pela utilização do transformador CTFC12-9 para a parte eletrónica, devido ao facto de possuir uma corrente nominal de 667mA, uma tensão no seu secundário de 18V e por se apresentar como a solução mais barata disponível. Por sua vez, para o circuito de alimentação dos amplificadores de isolamento, optou-se pela utilização do transformador Myrra 44167 com dois enrolamentos secundários, apresentando uma tensão eficaz de 18V em cada secundário e uma corrente nominal de 64mA.

O *hardware* implementado para a parte eletrónica pressupõe a utilização das seguintes fontes de alimentação: 12V, 5V, 3.3V e -12V. A figura 3.19 apresenta o diagrama de blocos das fontes para a parte eletrónica.

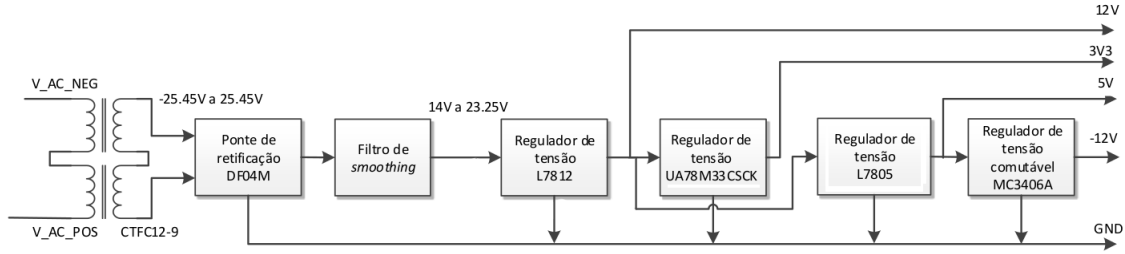


Figura 3.19: Diagrama de blocos das fontes de alimentação da parte eletrónica

A retificação do sinal com posterior filtragem, é dimensionada tendo em conta a tensão mínima que é necessária manter à entrada dos reguladores de tensão, visando garantir a respetiva tensão de *dropout*. Sabendo que o regulador de tensão de 12V possui uma tensão de *dropout* igual a 2V, e que em cada diodo da ponte de retificação existe uma queda de tensão de 1.1V, obteve-se um valor máximo de 9.25V para a tensão de *ripple* através da equação 3.7. Na qual $V_{p_{fonte}}$ representa a tensão de pico à saída do transformador, V_d a tensão nos diodos de retificação e V_{reg} a tensão à saída do regulador de 12V.

$$V_{ripple(max)} = V_{p_{fonte}} - 2V_d - (V_{dropout} + V_{reg}) \quad (3.7)$$

O condensador do filtro de *smoothing* é calculado através da equação 3.8, a qual possibilita o calculo da capacidade mínima a usar no filtro, a fim de garantir uma tensão de *ripple* menor que a anteriormente calculada. Devido à retificação existente, a frequência do sinal à saída do circuito de retificação duplica, tendo-se utilizado f igual a 100Hz, por sua vez, a corrente de pico máxima fornecida pelo transformador apresenta um valor de 0.94A. Por último, igualando V_{ripple} a 9.25V, obteve-se, com a equação anterior, C_{min} igual a 1020 μ F. Tendo-se na prática, implementado 3 condensadores de 470 μ F em paralelo para o filtro de *smoothing*.

$$V_{ripple} = \frac{I_L}{f \cdot C} \quad (3.8)$$

A implementação das tensões de 12V, 5V e 3V3 realizou-se através dos reguladores L7812ACV, L7805ABV e UA78M33CKCS, respectivamente. A figura 3.20 apresenta o respetivo circuito.

Por sua vez, o dimensionamento da fonte de -12V incidiu na utilização do regulador de tensão comutada MC34063A, na sua configuração inversora (figura 3.21). Devido ao facto de necessitar na sua entrada de uma tensão situada entre os 4.5V e 6V, aplicou-se, nesta última, a tensão de 5V gerada pelo regulador L7805ABV. Para o dimensionamento da fonte de comutação é necessário, primeiramente, calcular o rácio entre os tempos t_{on} e t_{off} do sinal de PWM dado pela equação 3.9. Na qual V_F representa a tensão de condução do diodo de *schottky*, cerca de 0.6V, por sua vez V_{CEsat} , segundo o *datasheet* do componente, apresenta o valor de 1V. Tendo-se obtido, com a equação anterior, um valor de 3.15.

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{|V_{out}| + V_F}{V_{in} - V_{sat}} \quad (3.9)$$

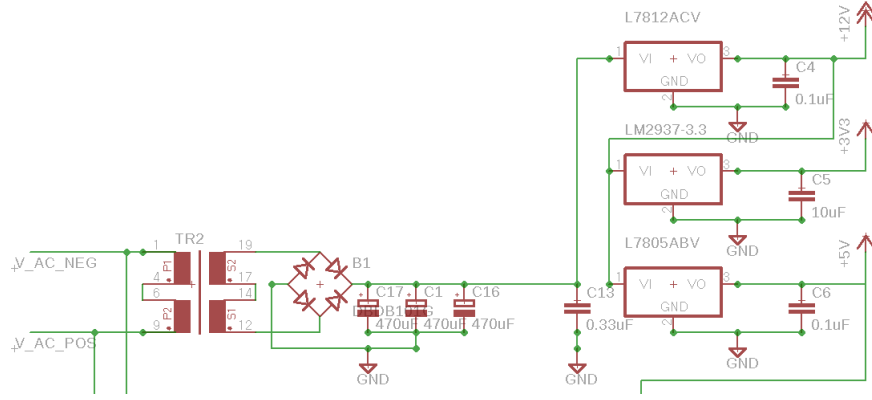


Figura 3.20: Circuito elétrico das fontes de tensão de 12V, 5V, e 3.3V

De forma a garantir uma corrente na saída de 25mA, calculou-se a corrente de pico de *switching* ($I_{pk}(switch)$) especificada pela equação 3.10, com a qual se obteve um valor de 207mA.

$$I_{pk}(switch) = 2 \cdot I_{out} \left(\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1 \right) \quad (3.10)$$

A configuração inversora deste componente, necessita ainda do uso de uma bobine, sendo o seu valor mínimo expresso pela equação 3.11. Tendo em vista a utilização de um valor de $300\mu\text{H}$ com uma tolerância de 10%, igualou-se L_{min} a $250\mu\text{H}$ de forma a garantir a indutância mínima necessária. Tendo-se obtido através da formula 3.11 um valor de $12.89\mu\text{s}$ para t_{on} .

$$L_{min} = \frac{V_{in}(min) - V_{sat}}{I_{pk}(switch)} t_{on} \quad (3.11)$$

Posteriormente utilizando este último valor calculou-se o valor do condensador cerâmico designado por “Timing Capacitor” através da equação 3.12. Com a qual se obteve um valor de 500pF .

$$C_T = 4.0 \times 10^{-5} \times t_{on} \quad (3.12)$$

Definindo uma tensão de *ripple* na ordem dos 30mV obteve-se para o condensador C_o um valor de $100\mu\text{F}$ através da equação 3.13.

$$C_o = \frac{I_{out} t_{on}}{V_{ripple}(pp)} \quad (3.13)$$

Tendo-se de seguida dimensionado o valor de R_{sc} a partir da equação 3.14, com a qual se obteve 1.46Ω . Na prática utilizou-se o valor mais próximo disponível, 1.5Ω .

$$R_{sc} = \frac{0.3}{I_{pk}(switch)} \quad (3.14)$$

Por último, dimensionou-se o ganho do circuito através da fórmula 3.15, tendo-se obtido para as resistências R2 e R1 os valores de $1\text{k}\Omega$ e $8.6\text{k}\Omega$, respetivamente. A figura 3.21 apresenta o seu respetivo circuito.

$$V_{out} = -1.25 \left(\frac{R2}{R1} + 1 \right) \quad (3.15)$$

Por sua vez, as fontes de alimentação dimensionadas para os amplificadores de isolamento vem ilustrado na figura 3.22.

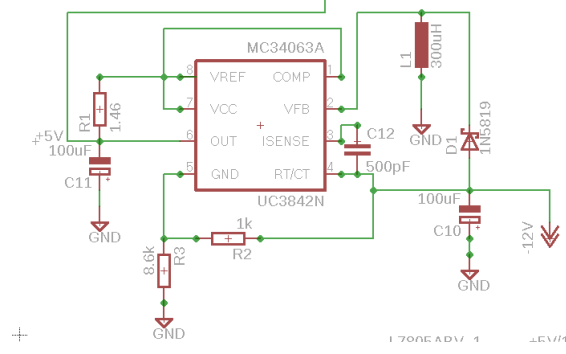


Figura 3.21: Circuito elétrico da fonte de -12V

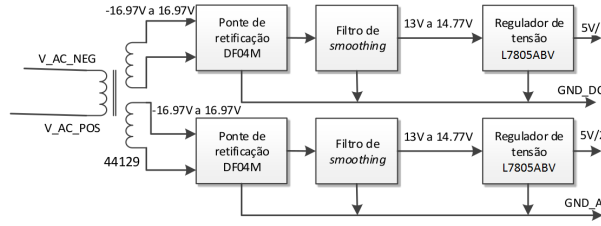


Figura 3.22: Fontes de Alimentação para os amplificadores de Isolamento

Com o objetivo de garantir uma queda de tensão no regulador superior à sua tensão de *dropout*, especificou-se primeiramente a tensão de *ripple* máxima, a fim de identificar a capacidade mínima necessária a implementar no filtro. Com o auxílio da equação 3.7, na qual se definiu $V_{dropout}$, V_{reg} , $V_{p_{fonte}}$ e V_d com os valores de 2V, 5V, 25.45V e 1.1V, respetivamente, obteve-se um valor de 16.25V para a tensão de *ripple* máxima. Posteriormente, utilizando este último valor, e visando um fornecimento da corrente máxima do transformador à carga, 64mA nominais, calculou-se, com o auxílio da equação 3.8 o valor da capacidade mínima a implementar no filtro de *smoothing*. Com a qual se obteve um valor mínimo de $55\mu F$. Na pratica optou-se pela utilização de uma capacidade de $100\mu F$. O circuito implementado é ilustrado na figura 3.23.

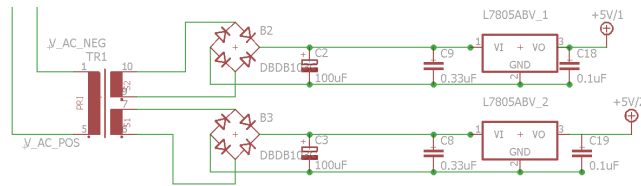


Figura 3.23: Circuito das fontes de alimentação 5V para os amplificadores de isolamento

3.4 PROTOTIPAGEM DO CIRCUITO

O dimensionamento anterior, possibilita especificar todos os componentes necessários a implementar para a conceção do *hardware*, sendo apresentados os mais relevantes na tabela 3.7. Relativamente ao custo do hardware, o somatório de todos os componentes colocados na PCB apresenta um valor total de €57.95, sendo que o mini-painel solar apresenta um custo de €12. Obviamente que apesar da

Quantidade	Componente	Descrição	Preço
3	DF04M	Ponte de rectificação	0.37
3	L7805ABV	Regulador de 5V	0.53
1	L7812ACV	Regulador de 12V	0.75
1	UA78M33CKCS	Regulador de 3.3V	0.49
1	MC34063AP	Regulador Ajustável	0.38
1	1N5819	Diodo de Schottky	0.03
1	CTFC12-9	Transformador	4.31
1	44167	Transformador	7.3
1	MCAP104428087	Bobina	4.31
2	ACPL-790B-300E	Amplificador de acoplamento óptico	7.37
1	TL084CN	Amplificador diferencial	0.44
1	MCP601	Amplificador diferencial	0.45
2	MCP6022	Amplificador diferencial	1.31
1	TL082	Amplificador diferencial	0.54
1	CSLA1CD	Sensor de corrente de efeito de Hall	14.62
1	DS1307	RTC	5.09
1	CS60-050L	Sensor de corrente AC	10.78
		Total	57,95

Tabela 3.7: Listagem dos componentes principais da PCB

quantia gasta na implementação deste protótipo, a integração da placa de desenvolvimento no próprio *hardware* do *logger* e a produção em grande escala do produto iria conduzir a uma diminuição do respetivo custo. Sendo ainda importante salientar o facto do custo de produção da PCB não ser tido em conta nos valores anteriores, dado ter sido produzida na universidade.

Para o desenho da placa, construíram-se numa primeira fase, todos os circuitos no Eagle, tendo-se posteriormente, importado o projeto para o modo de desenho de placas de circuito impresso. Devido às limitações da tecnologia disponível, apenas foi possível realizar o desenho das pistas na camada inferior da placa. Sendo que, a abordagem utilizada para o seu desenho, incidiu primeiramente no posicionamento dos componentes de forma estratégica, como é ilustrado na figura 3.24. Na qual é visível a existência da separação entre os circuitos de elevada e baixa tensão.

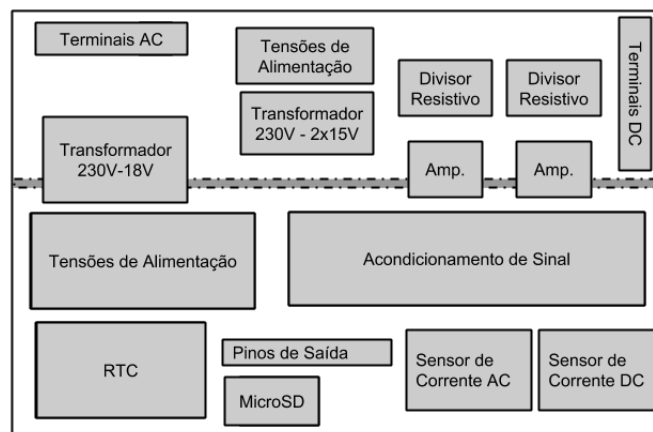


Figura 3.24: Organização dos elementos na PCB

3.5 FIRMWARE

Nesta secção são apresentados os elementos do *firmware* relativos a *device drivers*, processamento de informação e implementação da base de dados.

O microcontrolador, além de executar funções relativas à implementação de um servidor HTTP, é também utilizado para a amostragem dos sinais de tensão e corrente em ambos os lados AC e DC, e ainda, a leitura do sensor de radiação. Sendo ainda responsável pelo processamento destes valores.

Para tal são utilizados dois blocos de código essenciais. O primeiro, é responsável pela leitura dos canais da ADC, através de uma rotina de serviço à interrupção, sendo executada periodicamente. Enquanto que o segundo, é composto pelas instruções relativas ao processamento dos dados, interação com a base de dados (cartão *microSD*) e execução das tarefas relativas ao servidor HTTP, sendo executado repetidamente num ciclo infinito.

3.5.1 INICIALIZAÇÃO DO DISPOSITIVO

O funcionamento do servidor HTTP, depende de várias variáveis definidas globalmente, existindo para elas, a estrutura `APP_CONFIG` implementada com a stack TCP/IP. Nesta estrutura são definidas variáveis como o IP, *Host name*, *gateway*, *MAC address*, *username* e *password*. Sendo esta estrutura carregada para a memória RAM na inicialização do dispositivo, o seu tamanho máximo depende obviamente da memória disponível. Devido ao facto de não existir memória RAM suficiente para carregar a estrutura anterior contendo também o *email* do utilizador (cerca de mais 25 Bytes), definiu-se uma zona do cartão de memória para armazenar este valor.

Caso a estrutura não tenha um conteúdo válido, o sistema procede ao seu restauro pelos valores indicados por defeito. É importante referir o facto deste procedimento já ter vindo implementado no código exemplo fornecido com a placa, tendo-se efetuado a sua modificação a fim de incluir os campos *username* e *password*.

Posteriormente, é exercida a configuração dos timers utilizados, módulo de conversão analógico-digital, cartão de memória, sistema de ficheiros e inicialização da *stack* TCP/IP.

3.5.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados da plataforma, desde a conversão efetuada pela ADC até à salvaguarda dos valores calculados no cartão de memória, revela-se uma peça de extrema importância no dispositivo dimensionado, pois é deste que resulta toda a informação usada para a monitorização do sistema. A figura 3.25 ilustra o diagrama temporal das operações aqui envolvidas.

Nesta figura, o processo de amostragem, remete para a leitura dos dados relativos à corrente AC, corrente DC, tensão AC, tensão DC, e sensor de radiação através dos canais da ADC. O qual é realizado através da função de serviço à interrupção do timer2 (figura 3.27) com uma frequência de cerca de 1kHz. No mesmo processo, estes valores são armazenados em *buffers* circulares, no caso da corrente e tensão AC, e em somatórios no caso do sensor de radiação, tensão e corrente DC. Tendo-se implementado um ponteiro de introdução, ponteiro de retirada e uma variável de referência. A figura 3.26 ilustra o conceito de *buffers* circulares.

No processo Cálculo 1, assinalado no diagrama temporal anterior, é realizado uma primeira etapa

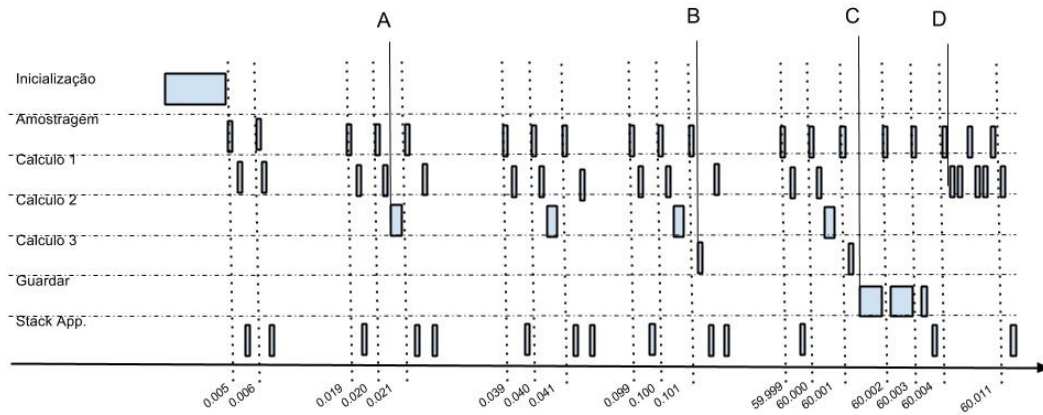


Figura 3.25: Diagrama temporal das operações de processamento

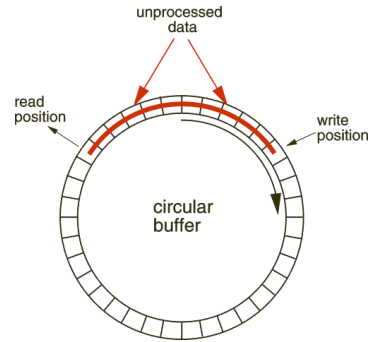


Figura 3.26: Ilustração de buffer circular (fonte:luaVIEW)

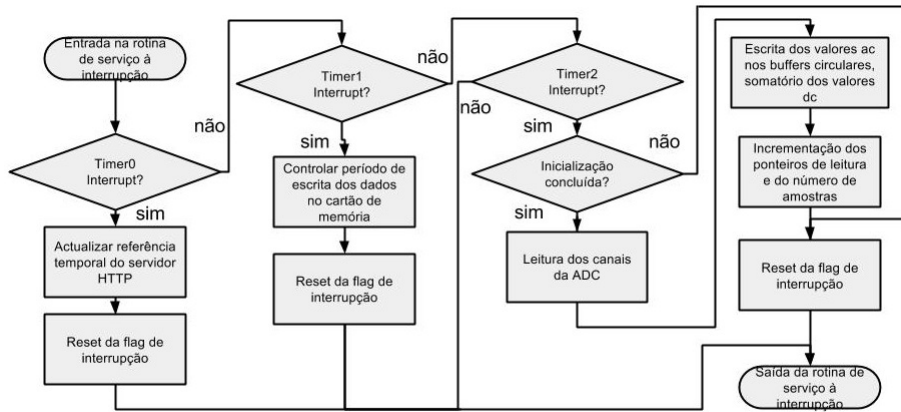


Figura 3.27: Fluxograma simplificado das rotinas de serviço à interrupção dos timers usados

do cálculo para o tratamento de dados relativos à tensão e corrente AC. Na qual, são calculados os somatórios do valor de cada amostra ao quadrado para a tensão e corrente, e ainda, calculado o somatório da potência instantânea. Sendo o processo iniciado pela conversão dos valores, obtidos a partir dos *buffers* circulares, através das equações 3.16 e 3.17. Nas quais, as resistências R_1 e R_2 representam os valores utilizados nos divisores resistivos, V_{offset_ADC} o valor do *offset*, G_{diff} o ganho aplicado do amplificador diferencial e G_{iso} o ganho fixo do amplificador de isolamento. Sendo ainda

aplicado um ganho e *offset* de calibração pelas variáveis, G_c e $V_{c_{offset}}$, respetivamente.

$$V_{ac} = \frac{(V_{vac_{ADC}} - V_{offset_{ADC}}) \times 3.3 \times (R2 + R1)}{1023 \times G_{diff} \times G_{iso} \times R2} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.16)$$

$$I_{ac} = \frac{(V_{iac_{ADC}} - V_{offset_{ADC}}) \times 3.3}{1023 \times sensibilidade} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.17)$$

Ainda neste processo, é implementado a detecção da passagem por zero, a fim de possibilitar o reconhecimento de um período do sinal. Sendo esta passagem detetada comparando o valor atual da tensão AC pelo anterior através da equação 3.18. Procedendo-se de seguida, após o reconhecimento de um período do sinal, para o processo calculo 2, assinalado por A na figura 3.25.

$$(vac > 0) \cap (vac_{old} \leq 0) \cup (vac < 0) \cap (vac_{old} \geq 0) \quad (3.18)$$

O calculo 2, consiste na finalização do processamento dos dados referentes a um período do sinal. No qual são inicialmente calculados os valores eficazes da tensão e corrente e potência ativa. Sendo posteriormente calculada a potência aparente através da multiplicação dos valores eficazes anteriores, por sua vez, a potência reativa é obtida através da equação 2.20. Para finalizar o processo são calculadas as respetivas energias multiplicando a potência calculada pelo período do sinal (0.02s).

O calculo 3, assinalado no diagrama temporal por B, é responsável pelo processamento dos sinais relativos à tensão DC, corrente DC e sensor de radiação, sendo executado a cada 100ms. Neste, é primeiramente calculada a média dos registos contendo o somatório dos valores aqui tratados, procedendo-se posteriormente, à conversão das médias obtidas através das equações 3.19, 3.20 e 3.21. Sendo calculada a potência DC e o respetivo valor de energia pela sua multiplicação com o período com que é realizado o cálculo 3 (100ms).

$$V_{dc} = \frac{V_{vdc_{ADC}} \times 3.3 \times (R2 + R1)}{1023 \times G_{diff} \times G_{iso} \times R2} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.19)$$

$$I_{dc} = \frac{(V_{idc_{ADC}} - V_{offset_{ADC}}) \times 3.3}{1023 \times sensibilidade} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.20)$$

$$V_{rad} = \frac{V_{rad_{ADC}} \times 3.3}{1023} \times G_c + V_{c_{offset}} \quad (3.21)$$

Com o intuito de estimar os valores médios relativos às potências, tensão e corrente anteriormente calculadas para períodos mais alargados, é efetuada a soma dos valores obtidos com os cálculos 2 e 3 em registos próprios. O cálculo das respetivas médias é realizado aquando da escrita dos valores no cartão de memória.

Por último, no processo Guardar, é realizada a escrita de uma entrada da tabela de dados no cartão de memória e geração de alertas, sendo executado a cada minuto (processo assinalado por C no diagrama temporal). Neste processo são calculados os valores médios do sensor de radiação, tensões, correntes, potências e ainda os respetivos valores de energia, sendo posteriormente guardados no cartão de memória, introduzindo assim uma nova entrada na base de dados. Este processo é de todos o que necessita de mais tempo de processamento, o que por consequência, irá fazer com que o *buffer* circular vá sendo preenchido durante o mesmo período, existindo a necessidade do seu tamanho proporcionar o armazenamento dos dados amostrados durante este período para evitar a perda de informação. O evento D, procura ilustrar esta situação, tendo-se após a salvaguarda dos dados no cartão procedido ao tratamento da informação acumulada nos *buffers*. Ainda relativamente aos *buffers* é evidente a necessidade de existir uma velocidade de leitura superior à de escrita para evitar a perda de informação.

Neste processo são ainda geradas as *flags* de alerta a partir da análise dos valores a serem guardados na base de dados.

O fluxograma relativo a todo o processamento de informação vem ilustrado na figura 3.28.

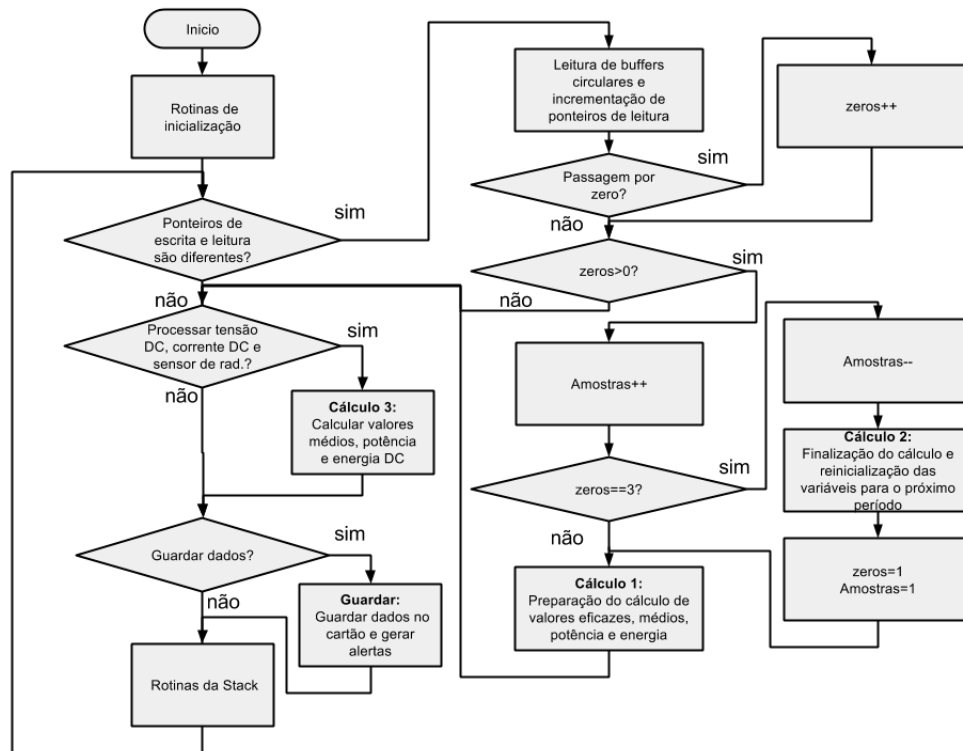


Figura 3.28: Fluxograma simplificado do processamento dos dados na main do programa

3.5.3 BASE DE DADOS

A base de dados é implementada com a utilização de um cartão de memória. No qual são guardados dados relativos ao funcionamento da aplicação, sistema de ficheiros, e registos de monitorização. A figura 3.29 apresenta a ilustração desta divisão sendo indicados os respetivos endereços de memória iniciais.

O acesso a estes dados é realizado com a utilização dos endereços previamente definidos, ou através de um ponteiro armazenado na memória do cartão, para o caso da escrita dos registos do *logger* na memória.

A tabela 3.8 descreve os elementos da figura anterior.

Sendo realizada previamente, em cada operação de escrita, a leitura do ponteiro indicado, a fim de obter o próximo endereço de memória livre. Após a escrita é necessário atualizar o seu valor, adicionando ao seu valor o número de bytes escritos na memória.

A figura 3.30 ilustra o bloco de dados correspondente a uma entrada na base de dados introduzida pelo *logger* em cada operação Guardar ilustrada na figura 3.25 do ponto anterior.

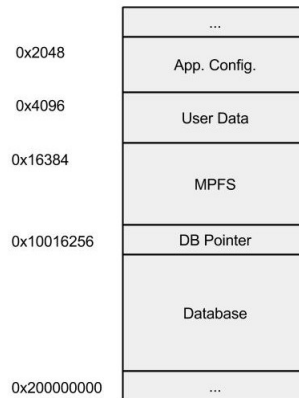


Figura 3.29: Organização dos elementos no cartão de memória

Elemento	Descrição
App. Config	Estrutura contendo os dados de configuração do servidor HTTP (IP, gateway, mac address, username, password, etc.)
User Data	Estrutura auxiliar à anterior contendo outros dados do utilizador, como o seu endereço de email
MPFS	Sistema de ficheiros da microchip contendo as páginas WEB e respetivos ficheiros auxiliares
DB Pointer	Ponteiro com o valor da próxima posição livre da base de dados
Database	Base de dados

Tabela 3.8: Descrição das zonas de memória

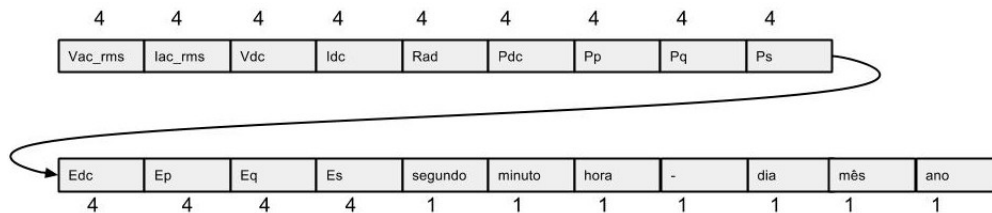


Figura 3.30: Estrutura de dados a ser guardada no cartão de memória

3.6 PLATAFORMA WEB

No âmbito deste trabalho, é implementada uma plataforma WEB, de forma permitir ao utilizador o controlo e visualização da monitorização através de um computador ou dispositivo móvel. Sendo composta pelo conjunto das seguintes páginas: inicial, visão global do sistema, configurações, gestão de energia e alertas. A implementação da plataforma visa ainda a implementação de funcionalidades como o envio de alertas e relatórios via *email*, apresentação de gráficos, definição de alertas e consulta de históricos de energia. As imagens relativas ao *software* podem ser observadas no anexo A1.

A página de visão global do sistema é criada com o intuito de dar ao seu *user* um sumário do estado atual do sistema de produção. Na qual, são disponibilizados gráficos relativos aos dados de potência, energia e de valores médios para cada um dos sinais amostrados durante as últimas 24 horas. Além disso ainda são disponibilizadas mensagens de alerta e a hora e data do sistema. Por sua vez, a página de configurações permite ao utilizador configurar o dispositivo de monitorização, podendo alterar as suas credenciais de acesso, hora, data, email, e de variáveis relativas às configurações de rede do *hardware* (IP, *gateway*, DNS, etc.). Outra página importante, remete para o capítulo da energia,

onde são disponibilizados gráficos relativos à potência e energia monitorizada em ambos os lados DC e AC. Existindo três tipos distintos de gráficos: gráfico diário, mensal e anual. Por último, a página de alertas destina-se à listagem de todos os alertas do sistema, possibilitando a criação/edição/eliminação dos mesmos.

A implementação do *software* aqui apresentado é desenvolvido com a utilização de código a ser executado pelo *browser* do cliente (*html*, *xml*, *javascript* e *css*). Tendo-se também utilizado ferramentas como o *jQuery*, *Bootstrap*, Asynchronous Javascript and XML (AJAX), *Flot* e *jsPDF* para a implementação de funcionalidades na plataforma.

Para a implementação da plataforma no *webserver*, é necessário converter todos os seus ficheiros para um formato que permita ao microcontrolador realizar a sua gestão. Para tal é utilizada uma ferramenta em *java* fornecida pela *microchip*, denominada por MPFS. A qual possibilita a criação de um sistema de ficheiros, cujo output (ficheiro binário), é enviado para o microcontrolador, através do mesmo programa, sendo armazenado em memória.

3.6.1 BIBLIOTECAS E APIS

O *jQuery* consiste numa biblioteca de *javascript* a fim de simplificar a sua utilização, sendo bastante utilizado por diversas Application Programming Interfaces (APIs) e *frameworks*. Por sua vez, o AJAX, permite a modificação de conteúdo da página sem que seja necessário sair da mesma, possibilitando a troca de informação sem interferir na interação do utilizador com a plataforma. Relativamente às APIs utilizadas, ambas dependentes do *jQuery*, permitem a construção de gráficos, no caso do *Flot*, e a criação de documentos .pdf utilizando a ferramenta *jsPDF*.

Ainda é importante de referir a utilização do bootstrap, sendo uma *framework* bastante útil para a construção de *websites*, simplificando o seu desenvolvimento através da disponibilização de um grupo de funcionalidades ao nível do CSS, javascript e de vários elementos (e.g. menus de navegação). A sua utilização permite ainda o desenvolvimento de plataformas com a capacidade de se adaptarem a terminais de diferentes tamanhos.

3.6.2 PÁGINAS DINÂMICAS

O acesso aos dados da plataforma é realizado através de ciclos de pedidos/reposta entre o cliente e o servidor Hypertext Transfer Protocol (HTTP). O servidor, implementado com o uso da *stack* TCP/IP na placa de desenvolvimento, processa os pedidos, enviando posteriormente os dados solicitados. Sendo que, as páginas desenvolvidas apresentam um conteúdo dinâmico. A geração deste tipo de conteúdo, é realizado com a introdução de *strings* próprias no código das páginas WEB, existindo posteriormente a introdução de informação no seu lugar por parte do microcontrolador. Sendo a especificação destas *strings* realizada do seguinte modo: `~<designação>~`.

As funções chamadas neste processo são definidas na *stack* TCP/IP, mais concretamente no ficheiro `CustomHTTPApp.c`, através da definição de funções do tipo *void* cujo nome é especificado através da regra `HTTPPrint_<designação>`. Estas funções, possibilitam o envio de conteúdo, colocando a informação diretamente no *socket* do TCP.

3.6.3 ESTRUTURAS DE DADOS

As estruturas de dados para as páginas, são implementadas recorrendo a ficheiros XML. Estes permitem a estruturação dos dados utilizando *tags* definidas pelo programador. Na plataforma, o conteúdo original destes ficheiros é definido apenas por uma *tag* de inicialização e terminação do mesmo, existindo entre ambas a especificação de uma *string* a fim de ser substituída por conteúdo dinâmico. Por exemplo, na abordagem realizada para obter os dados armazenados relativos à monitorização, o ficheiro XML é composto pelo seguinte conteúdo: `<sensors_samples>~iterations_teste(0)~</sensors_samples>`. Sendo representado na figura 3.31 o conteúdo inicial deste ficheiro gerado a partir de um teste de simulação. Neste caso, o *webserver* implementado no micro-controlador, ao detetar a *string* de conteúdo dinâmico aquando do envio do ficheiro, procede ao upload dos dados presentes no cartão de memória, sendo cada um deles colocado entre uma *tag* própria previamente especificada.

```
-<sensors_samples>
-<x>
  <e>19319321</e>
  <va>229.827</va>
  <ia>30.091</ia>
  <vd>650.606</vd>
  <id>10.729</id>
  <r>3.300</r>
  <pd>6.980</pd>
  <pp>5.974</pp>
  <pq>3.482</pq>
  <ps>6.915</ps>
  <ed>46.417</ed>
  <ep>39.614</ep>
  <eq>12.006</eq>
  <es>45.615</es>
  <s>0</s>
  <m>50</m>
  <h>23</h>
  <d>31</d>
  <mo>12</mo>
  <y>15</y>
</x>
```

Figura 3.31: Ficheiro XML obtido com a simulação da operação do sistema

Embora na figura anterior, seja apenas apresentado o conteúdo referente a um *save*, são enviados muitos mais dados para o ficheiro do exemplo anterior, chegando a carregar dados relativos a 24 horas. Como tal, é necessário ter em consideração o tamanho disponível no *socket* do TCP durante a transmissão. Resumidamente, este processo é gerido através de uma máquina de estados relativa à conexão HTTP, podendo-se especificar através da variável `callbackPos` da estrutura `HTTP_CONN` a necessidade de executar novamente a função. Sendo desta forma, enviado um grupo de dados de cada vez.

Durante a interação do utilizador com a plataforma, o acesso a estas estruturas de dados é realizado sem que o utilizador se aperceba, com o pedido dos dados ao servidor realizado através de AJAX. Sendo os dados posteriormente extraídos do ficheiro XML através de uma rotina em *javascript*. Por último, os dados obtidos são utilizados para gerar gráficos e atualizar elementos da página.

Para a troca de dados entre o servidor e a plataforma WEB são definidos 3 ficheiros XML. Existindo um responsável pelo armazenamento de variáveis gerais como a hora e data. Um segundo, para a consulta dos dados relativos aos sinais monitorizados na plataforma, e um último, para a consulta dos alertas ativos.

A estrutura de dados relativa à consulta dos registos da plataforma, ilustrada na figura 3.31, é iniciada pela *tag* `<sensor_samples>`, existindo posteriormente, num estado hierárquico inferior, a *tag* `<x>` representando cada um dos *saves* carregados do cartão. A tabela 3.9 apresenta o significado de cada campo da estrutura.

Campo	Descrição
<x>	Grupo de dados de um <i>save</i>
<e>	Endereço de memória inicial
<va>	Tensão AC eficaz média
<ia>	Corrente AC eficaz média
<vd>	Tensão DC média
<id>	Corrente DC média
<r>	Tensão do sensor de radiação
<pp>	Potência ativa média
<pq>	Potência reativa média
<ps>	Potência aparente média
<pd>	Potência DC média
<ep>	Energia ativa
<eq>	Energia reativa
<es>	Energia aparente
<ed>	Energia DC
<s>	Segundos
<m>	Minutos
<h>	Horas
<d>	Dia
<mo>	Mês
<y>	Ano

Tabela 3.9: Descrição dos campos do ficheiro XML relativo à consulta do registo de monitorização

Por sua vez, a estrutura relativa à comunicação dos alertas especificados, é iniciada pela *tag* `<alert_table>`, sendo cada alerta especificado iniciado por `<alert>`. Posteriormente, são utilizadas ainda as *tags*, `<alertID>`, `<valueID>`, `<data1>` e `<data2>` para especificar o tipo e valores do alerta.

Por último, o ficheiro XML onde são colocadas as variáveis globais, possui uma estrutura bastante simples, onde são colocadas apenas as *tags* associadas a cada variável, não existindo qualquer relação hierárquica para além da *tag* que o inicia. Este ficheiro é utilizado para fornecer a hora, data e mensagens de erro à interface WEB.

3.6.4 A PLATAFORMA E SUAS FUNCIONALIDADES

Ao longo das páginas da plataforma, são disponibilizadas ao utilizador algumas funcionalidades para a proteção do conteúdo da monitorização, visualização de gráficos, especificação de alertas e definição de variáveis do sistema.

Relativamente à segurança, é utilizado um mecanismo de *login* a fim de proteger os dados gerados pelo *logger*. A figura 3.32 apresenta o seu diagrama simplificado.

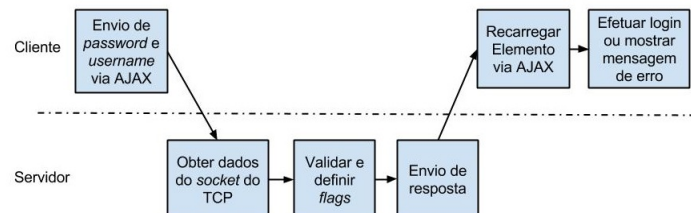


Figura 3.32: Diagrama de processo de *login*

A abordagem seguida, baseia-se no envio das credenciais para o servidor através de um AJAX *request*, procedendo-se à respetiva validação na rotina `HTTPExecuteGet`. Consoante o seu resultado

o servidor altera o valor das suas *flags* `Last_Success` e `Last_failure`. Caso o pedido AJAX seja executado com sucesso, é recarregado o ficheiro `error_div_1.htm`. O qual contém dois elementos fundamentais deste processo, o *div* contendo a mensagem de erro a mostrar ao utilizador e um *script* para proceder ao reencaminhamento para a página *Global Vision*. A escolha entre mostrar a mensagem de erro e o reencaminhamento de página é realizada através do uso de conteúdo dinâmico, com a introdução das strings `~status_ok~` e `~status_fail~` no código do ficheiro anterior. Estas são utilizadas para alterar o seu código, a fim de realizar a operação pretendida. No caso do redirecionamento da página, são adicionadas as mesmas credenciais no *URL* da seguinte forma: `http://<user>:<password>@<ip>/protect/global.htm`. O endereço IP a introduzir, é também inserido no código da página recorrendo a uma variável dinâmica. Sendo neste último passo que se efetua a autenticação propriamente dita.

Por sua vez, na página *Geral Vision*, é disponibilizada a possibilidade de selecionar o conteúdo a mostrar no gráfico existente. Ao ser carregada a página, ou clicado num dos botões do gráfico, é carregado o gráfico com a opção selecionada por defeito ou com a escolhida pelo utilizador, sendo para tal, executada a função `change_chart` existente no *script* do ficheiro `global.htm`. A rotina executada, procede ao envio de um GET request via AJAX para obter o ficheiro `sensor_values.xml`. No qual são colocadas os *saves* das últimas 24 horas. Posteriormente, o ficheiro é percorrido utilizando funções disponibilizadas pelo *jQuery*, sendo calculados a partir dos dados extraídos, os valores médios para períodos de 1 hora, tendo em vista a criação de gráficos diários, com uma resolução temporal de uma hora.

Relativamente à página de energia, os dados dos gráficos são carregados usando o mesmo procedimento. Existindo a possibilidade de carregar os registos referentes a um dia específico e de realizar zoom nos gráficos diários. Para tal, é primeiramente, através de um AJAX GET request para o ficheiro `helper_v.htm`, enviando o dia, mês e ano dos dados a serem carregados como argumentos. O servidor, na sua rotina `HTTPExecuteGet`, ao verificar o pedido de acesso ao ficheiro anteriormente especificado, procura pelas variáveis anteriores e atualiza as suas variáveis globais correspondentes. Após este processo, é efetuado o mesmo processo anterior, diferindo apenas na introdução de um argumento na string de conteúdo dinâmico, a fim de diferenciar a operação de carregar os dados de uma data específica e das últimas 24 horas. Na mesma página, ainda são gerados os gráficos mensais e anuais da plataforma, seguindo um processo análogo. Na mesma página foi ainda incluída a ferramenta para gerar um documento PDF, a fim de se criarem relatórios sobre a produção do sistema. Porém, esta funcionalidade não foi completada.

Por sua vez, na página de alertas, embora tenham sido criadas as funções necessárias para a sua especificação no *software*, não se procedeu à sua utilização no servidor WEB devido à ausência de RAM livre no dispositivo. Não se tendo completado esta funcionalidade da plataforma.

Por último, a página de definições permite a alteração de parâmetros fundamentais do programa como o email, password, hora e data, e de variáveis de configuração de rede (IP, Gateway, DNS, DHCP, MAC, etc.). Mais uma vez, as alterações realizadas nesta página são enviadas para a plataforma através de pedidos via AJAX. Após a redefinição dos dados do utilizador, a plataforma redireciona o *user* para a sua página de login, a fim de introduzir as novas credenciais. Por sua vez, ao serem definidos os novos parâmetros de rede, é realizado um reboot à placa de desenvolvimento. É importante referir, que a funcionalidade de salvar as definições da rede, já vinha por defeito, implementada no código de demonstração fornecido pelo fabricante da placa.

Além da dificuldade encontrada para a implementação dos alertas no sistema, devido à ausência de memória RAM no microcontrolador, também não foi possível, implementar o envio de alertas por

email, devido à necessidade de ser necessário utilizar uma quantidade considerável de RAM para gerar a encriptação SSL requerida pelos servidores de email atuais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de testes realizados com o objetivo de classificar o desempenho dos elementos desenvolvidos e efetuar a sua validação. Sendo testados o desempenho do *hardware*, *software* e *firmware* implementado.

4.1 PLACA DE DESENVOLVIMENTO

A placa desenvolvimento utilizada, apesar de executar as tarefas relativas ao seu funcionamento como *webserver*, revelou-se incapaz de executar ambas as tarefas de servidor e de processamento de dados. O facto do seu microcontrolador, PIC18F, possuir apenas 4KBytes de RAM, e de ser necessária a maior parte desta RAM para o processamento da stack TCP/IP limitou fortemente o desenvolvimento do *software*, surgindo com frequência erros na compilação do programa relativos à memória RAM.

Com o objetivo de classificar a capacidade de processamento da placa, realizou-se um teste com o objetivo de medir com que periodicidade a mesma realizava uma nova iteração no seu ciclo infinito da *main*. Tendo-se colocado a placa de desenvolvimento a funcionar apenas como *webserver*. Para tal, definiu-se um porto como saída, colocando uma instrução para negar o seu valor dentro do ciclo infinito da *main*. Posteriormente, com o auxílio do osciloscópio, mediu-se o período do sinal gerado, obtendo-se cerca de 3ms. Concluindo-se assim que o micro-controlador não apresenta a capacidade de processamento suficiente para executar a implementação do buffer circular para uma frequência de 1kHz, devido ao facto de a velocidade de escrita no buffer ser superior à de leitura efetuada na *main*, conduzindo à perda de informação.

Outro problema identificado, surge com a necessidade de implementar um *buffer* circular com um tamanho tal que possibilite guardar as amostras obtidas quando forem executadas tarefas que necessitem de mais tempo de processamento. Por exemplo, considerando o cenário em que é necessário efetuar uma escrita no cartão de memória, e que este processo consome 20ms de processamento, é necessário que o *buffer*, tenha um tamanho suficiente para conseguir armazenar as amostras geradas durante o período. E mais uma vez, devido à falta de RAM, não foi possível realizar a implementação prática do sistema de monitorização.

As limitações encontradas na placa de desenvolvimento limitaram o produto final do trabalho, não tendo sido em tempo útil possível efetuar a sua substituição por uma com maiores capacidades.

4.2 HARDWARE

Nesta secção são testados os circuitos relativos à leitura das tensões e correntes (AC e DC). Os dados relativos às experiências dos circuitos anteriores, são obtidos com a amostragem das saídas destes circuitos em certas condições de teste, sendo enviadas as amostras obtidas para o terminal via UART. Posteriormente os dados obtidos no terminal são inseridos no *matlab* para gerar os resultados apresentados.

Nesta secção são ainda testados o *firmware*, *software* e fontes de alimentação.

4.2.1 SENSOR DE CORRENTE AC

O circuito responsável pela leitura de corrente AC é testado em laboratório recorrendo à amostragem do sinal na sua saída e com a realização dos respetivos cálculos no *matlab*. Sendo ainda utilizado um amperímetro para comparar as medidas realizadas. A fim de possibilitar a medição de dois valores diferentes de corrente, recorreu-se ao uso de um termo-ventilador de 2000W com um modo de funcionamento em potência máxima e outro em potência mínima.

Para caraterizar o *offset* do circuito, procedeu-se à amostragem do sinal com o termo-ventilador desligado. Tendo-se obtido um valor médio de 2.37V e um desvio padrão de $52\mu\text{V}$ para cerca de 100 amostras.

Posteriormente, procedeu-se à amostragem do sinal da ADC, introduzindo um dos fios condutores que fornece a alimentação para o termo-ventilador no interior do sensor (transformador de corrente). Tendo-se guardado as amostras correspondentes ao seu funcionamento máximo e mínimo, e realizado a medida do valor eficaz da corrente a partir de um amperímetro. Com o auxílio do *matlab* calcularam-se os valores eficazes correspondentes, tabela 4.1, e a construção dos respetivos gráficos ilustrados na figura 4.1.

Modo	Amperímetro (Arms)	Hardware (Arms)
Máximo	7.3	7.87
Mínimo	3.5	4.69

Tabela 4.1: Valor eficaz da corrente medida pelo *hardware* e amperímetro para cada modo do termo-ventilador

Utilizando os valores da tabela 4.1, procedeu-se ao cálculo da equação linear que relaciona os dois sistemas métricos, tendo-se obtido a relação expressa pela expressão 4.1. A figura 4.2 apresenta o respetivo gráfico.

$$y = 1.19x - 2.1 \quad (4.1)$$

Posteriormente, é possível utilizar a expressão anterior para calibrar o valor eficaz da corrente. Porém, a mesma calibração não pode ser aplicada à equação 3.17, devido ao facto de ter sido obtida recorrendo a valores eficazes.

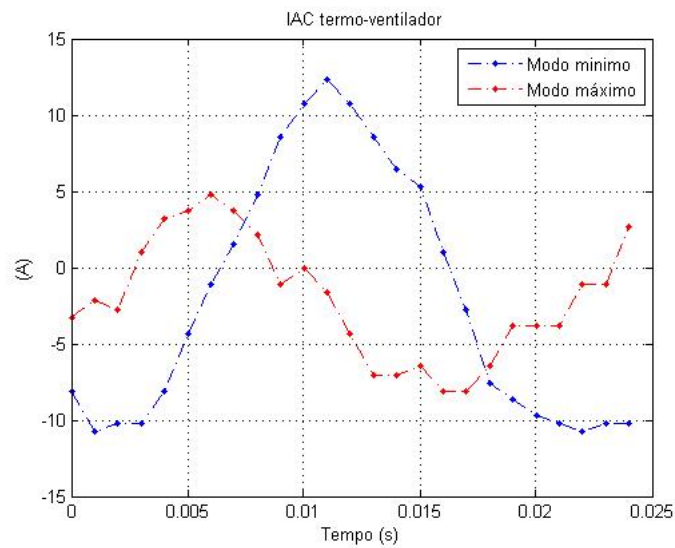


Figura 4.1: Gráficos de um período da corrente AC (termo-ventilador em modo mínimo e máximo) amostrados pelo *hardware* durante o funcionamento do termo-ventilador

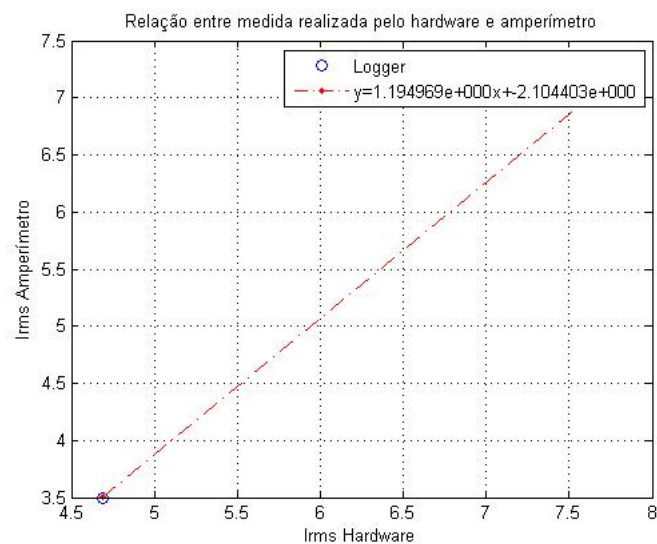


Figura 4.2: Linearização entre os valores medidos pelo *hardware* e amperímetro

4.2.2 SENSOR DE CORRENTE DC

O sensor de corrente é caracterizado recorrendo a uma fonte de alimentação de 5V capaz de debitar um máximo de 5A e de um conjunto de resistências de potência, com o intuito de formar diferentes cargas para efetuar medidas de correntes diferentes, tendo-se recolhido 50 amostras para cada carga. O procedimento seguido é análogo ao seguido na secção 4.2.1 para a corrente AC.

A tensão de *offset* do sensor é caracterizada amostrando a saída do circuito do *hardware* da leitura da corrente DC sem que exista nenhuma corrente em circulação no fio introduzido no interior do sensor. Com o procedimento obteve-se um valor de *offset* médio de 0.8075V e um desvio padrão correspondente de 0.0051.

Posteriormente, realizou-se a medida da corrente por intermédio do *hardware* dimensionado e amperímetro. A tabela 4.2 apresenta os valor médio e respetivo desvio padrão medido pelo *hardware*

para diferentes cargas.

<i>Resistência</i> (Ω)	Hardware (Valor Médio)	Hardware (Desvio Padrão)	Amperímetro (A)
1	3.5887A	0.1252A	3.95A
2	1.8769A	0.1069A	2.28A
2.5	1.4681A	0.0898A	1.87A
3	1.2210A	0.1219A	1.6A
4	0.8533A	0.1089A	1.24A

Tabela 4.2: Valor médio e respectivo desvio padrão para as correntes DC para as várias resistências

Utilizando os valores médios anteriores, e as leituras realizados com o amperímetro, relacionaram-se as medidas efetuadas através de um método de regressão linear. Com o qual se obteve a equação 4.2. Ordenando a fórmula anterior em a ordem a x (valores do amperímetro), obtém-se a equação 4.2, a qual pode ser realizada para calibrar o sensor, substituindo na formula 3.20 o ganho e *offset* de calibração pelo declive e *offset* da reta, respetivamente.

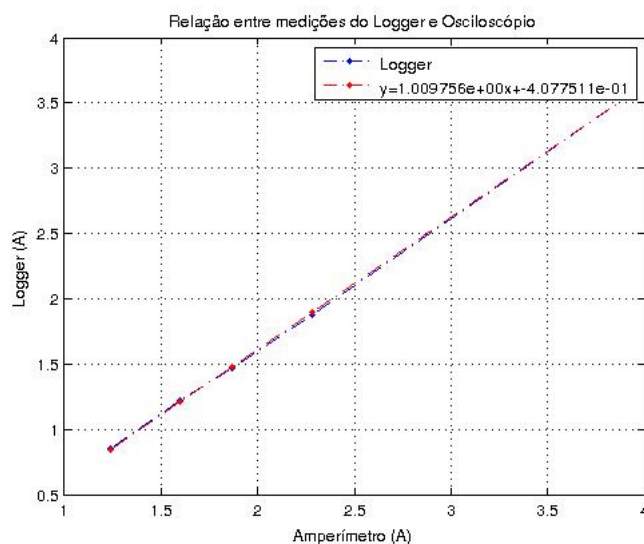


Figura 4.3: Relação entre corrente DC medida pela ADC e amperímetro

$$y = 0.991x + 0.403 \quad (4.2)$$

O modelo linear apresenta um declive muito proximo de uma unidade, o que em termos de ganho traduz-se numa grande proximidade entre os dois sistemas de medida. Contudo existe um *offset* de 403mA que poderá ser corrigido em software. Esta tensão de *offset* deve-se à incerteza de 10% em torno da tensão de *offset* imposta pelo sensor de efeito de Hall.

4.2.3 TENSÃO DC

O sensor de tensão DC é testado recorrendo à fonte do laboratório variando a sua tensão entre 0V e 10V. Para o teste procedeu-se à alteração do seu divisor resistivo, de forma a que a 10V na entrada do circuito, correspondesse a uma queda de 0.3V na entrada do amplificador de isolamento. Simulando assim, a variação dos valores em toda a sua gama de leitura.

Visando a caracterização da tensão de *offset* do circuito, procedeu-se à amostragem da sua saída, sem nenhum sinal na respetiva entrada. Tendo-se obtido um valor médio de 6mV, e um desvio padrão de 9.8mV.

Posteriormente, realizaram-se várias medidas através da amostragem do sinal na saída do *hardware* e com a utilização do osciloscópio. A tabela 4.3 apresenta os valores calculados a partir da leitura de 50 amostras para cada um dos casos, apresentando ainda o desvio padrão associado às medições efetuadas pelo *hardware* implementado.

Osciloscópio (V)	Hardware (V)	Hardware (Desvio Padrão)	Erro
0.002	-0.0073	0.0099	-0.0093
0.96	0.9292	0.0119	-0.0308
2.03	2.0259	0.0100	-0.0041
3.06	3.0767	0.0091	0.0167
5.14	5.1809	0.0111	0.0409
7.06	7.1295	0.0120	0.0695
8.03	7.9960	0.0115	-0.0340
9.07	9.0251	0.0354	-0.0449
10	9.9983	0.0102	-0.0017

Tabela 4.3: Valores médios medidos pelo *hardware* e osciloscópio com respetivo desvio padrão

A relação entre os dois sistemas de medição é obtida através de regressão linear a partir dos valores listados na tabela anterior. Tendo-se obtido a expressão 4.4. Ao ordenar a expressão anterior em ordem a x , é obtida a equação 4.3, a qual pode ser usada para calibrar os valores da corrente lidos pelos *hardware*.

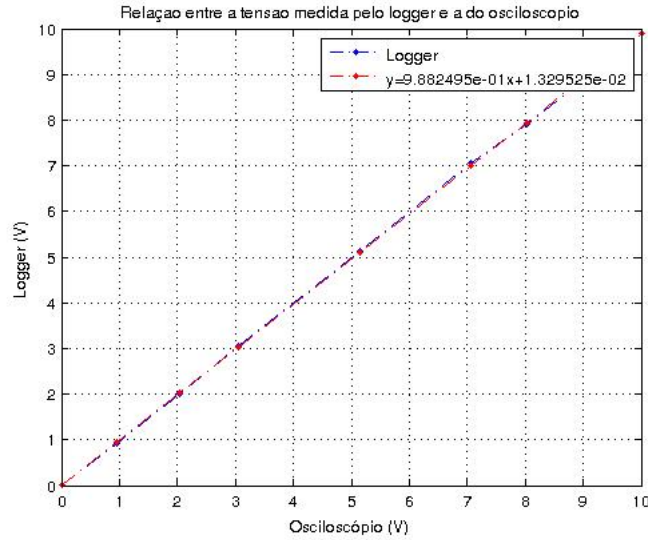


Figura 4.4: Relação entre tensão DC medida pela ADC e amperímetro

$$x = 1.012y + 0.0134 \quad (4.3)$$

Observando a equação linearizado, verifica-se que o *hardware* efetua medições muito próximas das obtidas com o amperímetro, devido ao declive da reta ser muito próximo de 1 e do *offset* ser próximo de 0.

Local	Logger	Voltímetro
A	233.144	234
B	225.227	226

Tabela 4.4: Valor eficaz da tensão medido pelo *logger* e voltímetro em dois locais diferentes

4.2.4 TENSÃO AC

Por sua vez, o circuito da tensão AC, é testado através da amostragem do sinal à saída do circuito correspondente no *hardware*, e com a utilização de um voltímetro, a fim de comparar as medidas efetuadas.

A tensão de *offset*, é obtida calculando a média das amostras correspondentes a um período do sinal. Tendo-se obtido um valor médio para a tensão de *offset* de 2.58V e um desvio padrão de 0.014mV.

A figura 4.5 apresenta uma onda de tensão amostrada pelo hardware.

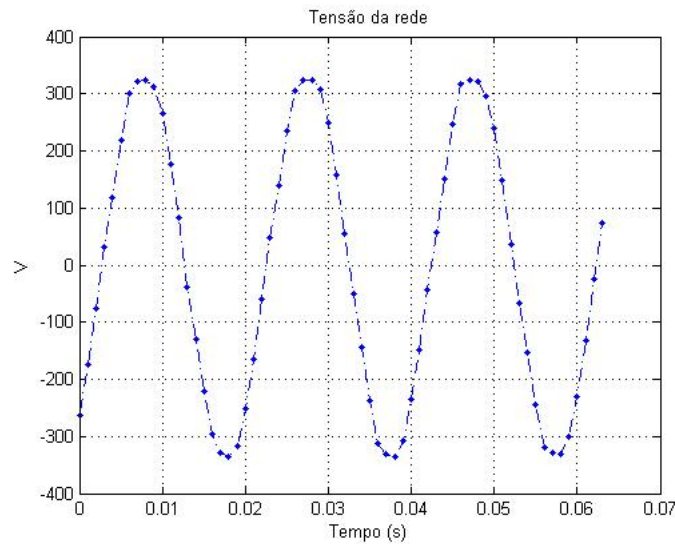


Figura 4.5: Tensão da rede elétrica medida pelo *hardware*

Posteriormente realizou-se o cálculo dos valores eficazes, das amostras obtidas em dois locais diferentes, A e B. Tendo-se também efetuado a leitura do mesmo valor com um voltímetro. A tabela 4.4 apresenta os dados obtidos com o procedimento anterior.

Através da tabela anterior e de um método de regressão linear, obteve-se a equação 4.4, a qual relaciona os dois sistemas de medida utilizados. A figura 4.6 apresenta o respetivo gráfico.

$$y = 1.01x - 1.7 \quad (4.4)$$

A equação anterior permite realizar a calibração do cálculo do valor eficaz da tensão aqui tratada. Contudo, assim como referido para o caso da corrente AC, esta equação não pode ser usada diretamente para calibrar a equação 3.16.

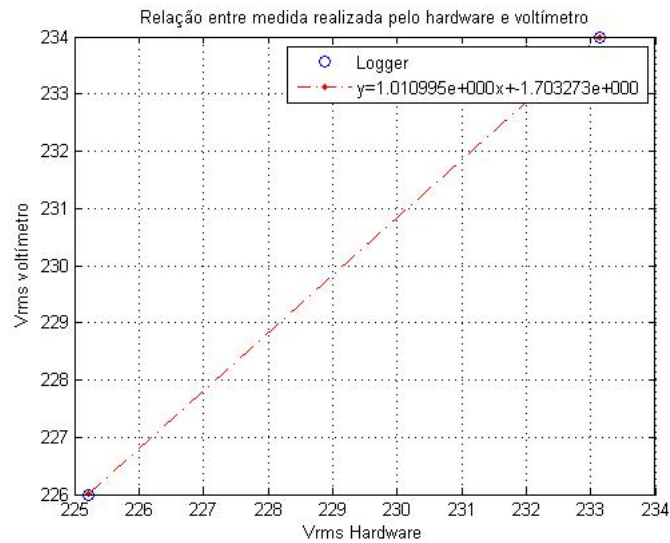


Figura 4.6: Relação entre a tensão da rede elétrica medida pelo *hardware* e voltímetro

4.3 FONTES DE ALIMENTAÇÃO

O teste das fontes de alimentação foi realizado tendo-se medido a tensão produzida por estes circuitos a partir de um voltímetro. A tabela 4.5 apresenta os valores obtidos.

Fonte	Tensão medida (V)
3.3V	3.25
5V	4.94
12V	11.9
-12V	-11.8

Tabela 4.5: Valores de tensão medidos para cada uma das fontes

Para verificar o isolamento entre as massas das alimentações geradas pelo transformador 1, 2/1 e 2/2 (figura 3.18) é realizado um teste de continuidade entre cada uma delas. Tendo-se verificado a ausência de condução entre as 3 massas, verificando-se assim a existência do isolamento pretendido.

4.4 SOFTWARE

Relativamente ao software, foram realizados testes à medida do seu desenvolvimento. Tendo-se validado as funcionalidades de *login* e *logout*, envio e recepção de dados entre a plataforma e o microcontrolador e a alteração das definições da mesma.

Com o objetivo de validar a exposição dos dados gravados, no cartão de memória, em gráficos na plataforma, procedeu-se à simulação de dados para um período de 3 anos e respetiva salvaguarda no cartão. Tendo-se posteriormente, realizado a consulta da informação gerada na plataforma WEB, tendo-se testado a funcionalidade de consulta de informação para uma data específica. Com o teste realizado verificou-se o correto funcionamento do algoritmo implementado. Porém é importante salientar o facto de que o algoritmo definido apenas funciona corretamente se o sistema funcionar continuamente, uma vez que se serve da data e hora da última amostra e do período de gravação para

aceder ao dia pretendido. Caso exista um período em que o sistema tenha sido desligado o algoritmo implementado deixa de ser válido.

Ainda, se realizou um segundo teste a fim de testar o envio de mensagens de erro para a plataforma. Utilizando o sensor de radiação e um potenciômetro, simulou-se a situação em que a tensão DC possui um valor inferior ao que seria de esperar tendo em conta a radiação incidente. Tendo-se posteriormente observado o resultado esperado, com a indicação da anomalia na plataforma.

4.5 FIRMWARE

O teste realizado ao nível do *firmware* incidiu sobre a validação do algoritmo de processamento implementado na secção 3.5.2. Devido ao facto da placa de desenvolvimento não apresentar capacidade de processamento suficiente para testar o algoritmo, procedeu-se à sua simulação com o uso de sinais estáticos amostrados a uma frequência mais reduzida, a fim de possibilitar a realização de todos os cálculos sem que fosse perdida informação.

Tendo-se para tal criado dois *buffers* de teste contendo valores estáticos de sinais sinusoidais. A tensão AC é definida como uma senoide com uma tensão eficaz de 230V eficazes. Sendo, por sua vez, o sinal criado para a corrente AC definido com um valor eficaz de 30A e um desfasamento em relação ao sinal de tensão de $\frac{\pi}{6}$. Para a tensão DC, corrente DC e sensor de radiação definiram-se os valores fixos de 650.6V, 10.72A e 0.252V, respetivamente. O processo aqui apresentado é o mesmo ilustrado pela figura 3.25, tendo-se apenas substituído o processo de escrita na base de dados pelo envio dos respetivos dados para o terminal.

A figura 4.7 apresenta os resultados obtidos. Na qual se verifica que os dados da tensão e corrente eficaz vão de encontro ao esperado. Estando também as potências e energias calculadas de forma correta.

Vrms	Irms	VDC	IDC	RAD	P_DC	P_P	P_Q	P_S	E_DC	E_P	E_Q	E_S	dt	N
229.827	30.091	650.606	10.729	0.252	6.980	5.974	3.482	6.915	0.116	0.099	0.057	0.114	59.845s	297
229.827	30.090	650.603	10.729	0.250	6.980	5.974	3.482	6.915	0.232	0.198	0.115	0.229	59.845s	297
229.827	30.090	650.608	10.729	0.250	6.980	5.974	3.482	6.915	0.348	0.298	0.173	0.345	60.046s	298

Figura 4.7: Teste do algoritmo de processamento

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O trabalho proposto nesta dissertação pressupõe o desenvolvimento de software, *firmware* e *hardware* para a concepção de um sistema de monitorização. Tendo-se construído o *hardware*, implementado a plataforma WEB e elaborado o *firmware* do dispositivo. Contudo, devido à falta de memória RAM do microcontrolador, e do facto do tempo de processamento disponível para efetuar a monitorização propriamente dita ser reduzido, existiu uma forte limitação no desenvolvimento do seu *firmware*, não se tendo conseguido implementar um sistema capaz de processar os dados lidos pelo *hardware* como seria idealizado. O envio de relatórios e alertas via email, constitui mais uma das funcionalidades não desenvolvidas devido à escassez de RAM no dispositivo. Todos estes problemas podem no entanto ser resolvidos utilizando uma placa de desenvolvimento que disponibilizasse maiores recurso (e.g. raspberry pi), ou com a execução do processamento e do servidor WEB em diferentes microprocessadores, com a utilização de dois pic32.

Com o desenvolvimento da plataforma WEB foram criadas um conjunto de páginas a fim de permitir a interação do utilizador com o *hardware* implementado. Tendo-se criado funções para a recepção e criação de gráficos e alteração de definições do *hardware*. Apesar de ter sido criada uma página para a definição de alertas personalizados, e da sua definição ser recebida com sucesso pelo microcontrolador não se realizou a sua associação com o *firmware*.

Relativamente ao *hardware*, verificou-se a existência de isolamento entre as diferentes massas criadas como era pretendido. Tendo-se obtido valores para as tensões de alimentação muito próximos dos pretendidos. Sendo que, a utilização de transformadores, conduziu à concepção de uma placa demasiado grande, podendo-se no futuro optar por outras soluções para possibilitar a redução do respetivo tamanho.

Com os testes realizados para a validação dos sensores implementados, concluiu-se que o sensor de corrente alternada (transformador de corrente), é o que apresenta os resultados mais dispersos comparativamente com o sistema de medida usado como referência. Devido à sua tensão de saída muito baixa e sensibilidade demasiado elevada (cerca de 6mV/Arms) conduz facilmente a erros de leitura, sendo necessário recorrer a um sensor mais preciso para obter melhores resultados. Por sua vez, os sensores de corrente DC, Tensão AC e DC, apresentaram resultados bastante próximos dos obtidos com os aparelhos de medida usados como referência. Tendo-se concluído serem adequados para

os requisitos do trabalho. Ainda assim, um dos seus pontos a melhorar nestes circuitos, passa pela utilização de tensões de *offset* com um valor mais aproximado ao que seria ideal, situação verificada no sensor de corrente DC (utilizada uma tensão de offset de 5.1V em vez de 5.4V) e no sensor de tensão AC, no qual são utilizadas tensões de 2.4V em vez de 1.665V.

5.1 TRABALHO FUTURO

Para a continuação deste trabalho, torna-se essencial a realização de uma revisão ao *hardware* implementado. Podendo-se considerar a substituição dos transformadores usados por fontes comutadas, a fim de diminuir as suas dimensões. E ainda, a implementação de tensões de *offset* mais próximas do seu valor ideal e a substituição do sensor de corrente AC.

Relativamente à plataforma de desenvolvimento, a utilizar para a implementação de um *webserver* e realização da monitorização, poderia-se optar por uma solução muito parecida à anterior, com a utilização de um PIC32-WEB, vendido pela mesma empresa (Olimex), possuindo 32KB de RAM e uma velocidade de processamento de 80MHz, utilizando ainda um segundo pic32 dedicado apenas às tarefas de processamento. Outra solução, passaria pela escolha de uma raspberry Pi, tendo um custo semelhante à solução anterior, oferecendo um desempenho muito superior. Por exemplo o Raspberry Pi B+ possui 512MB de RAM e uma velocidade de processamento de 750MHz. O seu elevado desempenho poderia permitir a implementação de algoritmos mais complexos para a identificação de anomalias no sistema de geração.

Por último, ao nível do *software* devem ser implementadas as funcionalidades de envio de alertas e relatórios via email, podendo-se ainda adicionar uma vertente financeira, na qual são descritos os lucros obtidos. Dependendo das capacidades da plataforma de desenvolvimento escolhida, poderia-se também implementar um sistema de vigilância ou um sistema de alarme a fim de proteger o sistema, tendo-se obviamente que adicionar o *hardware* necessário.

REFERÊNCIAS

- [1] D. G. de Energia e Geologia, *Renováveis estatísticas rápidas nº125*, Relatório, [Online; accessed 09-06-2015].
- [2] Decreto-Lei no 363/2007 de 2 de Novembro do Ministério da Economia e da Inovação, Diário da República: I Série, (2/11/2007), 7978 - 7984.
- [3] Decreto-Lei no 153/2014 de 20 de Outubro do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, Diário da República: I Série, (20/10/2014), 5298 - 5311.
- [4] M. H. Rashid, *Power electronics handbook: Devices, circuits and applications*. Academic press, 2010.
- [5] K. Tai, *The advantages of a pv monitoring system*, [Online; accessed 22-05-2015]. endereço: <http://www.civicsolar.com/resource/advantages-pv-monitoring-system>.
- [6] J. Keirstead, «Behavioural responses to photovoltaic systems in the uk domestic sector», *Energy Policy*, vol. 35, nº 8, pp. 4128–4141, 2007.
- [7] C. Brehaut, *Global pv monitoring: Technologies, markets and leading players, 2014-2018*, [Online; accessed 22-05-2015]. endereço: <http://www.greentechmedia.com/research/report/global-pv-monitoring-technologies-markets-and-leading-players-2014-2018>.
- [8] J. N. Mayer, D. S. Philipps, N. S. Hussein, D. T. Schlegl e C. Senkpiel, *Current and future cost of photovoltaics*, Estudo, [Online; accessed 24-05-2015].
- [9] SMA, *Sunny boy 3000tl datasheet*, [Online; accessed 24-05-2015]. endereço: <http://files.sma.de/dl/15330/SB5000TL-21-DAU131211W.pdf>.
- [10] —, *Sunny boy 240-us datasheet*, [Online; accessed 24-05-2015]. endereço: http://www.proinso.net/pub/doc/File/eeuu/Sunny_Boy_240_US.pdf.
- [11] —, *Sunny tripower 10000 tl datasheet*, [Online; accessed 24-05-2015], 2015. endereço: http://www.gehrlicher.com/fileadmin/content/pdfs/en/wechselrichter/SMA_Tripower_en.pdf.
- [12] —, *Sunny tripower 25000tl datasheet*, [Online; accessed 24-05-2015]. endereço: <http://www.koraxsolar.com/letoltes/inverterek/adatlapok/SMA%20Tripower%2020000-25000TL.pdf>.
- [13] KACO, *Powador 60.0 datasheet*, [Online; accessed 24-05-2015]. endereço: http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/TL3_Inverters_Powador_30.0_TL3_-_60.0_TL3/Data%20Sheets/DTS_PW_30-60_TL3_en_141023.pdf.
- [14] KAKO, *Kako blueplanet 5.0tl3 datasheet*, [Online; accessed 28-06-2015]. endereço: http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/blueplanet_5.0-9.0_TL3/Data_Sheets/DTS_bp_5-9_TL3_en.pdf.

- [15] —, *Kako powador 14.0tl3 datasheet*, [Online; accessed 28-06-2015]. endereço: http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/TL3_Inverters_Powador_9.0_TL3_-_20.0_TL3/Data%20Sheets/DTS_PW_12-20_TL3_en.pdf.
- [16] —, *Kako blueplanet 250 datasheet*, [Online; accessed 28-06-2015]. endereço: http://kaco-newenergy.com/fileadmin/data/downloads/products/Ultraverter_system/Data_Sheets/DTS_bp_ultraverter_system_en_150531.pdf.
- [17] A. Woyte, M. Richter, D. Moser, S. Mau, N. Reich e U. Jahn, «Monitoring of photovoltaic systems: Good practices and systematic analysis», em *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2013, pp. 3686–3694.
- [18] SMA, *Performance ratio: quality factor for the pv plant*, <http://files.sma.de/dl/7680/Perfratio-UEN100810.pdf>, Technical Information, [Online; accessed 29-06-2015].
- [19] G. Blaesser e D. Munro, «Guidelines for the assessment of photovoltaic plants document a photovoltaic system monitoring», *Joint Research Centre, Ispra, Italy, EUR 16338 EN, Issue 4.2*, 1995.
- [20] SMA, *Sma sunny web box user manual*, [Online; accessed 28-05-2015]. endereço: <http://files.sma.de/dl/4253/SWebBox-BA-US-en-34.pdf>.
- [21] GreenEnergyOptions, *Chorus pv display user manual*, [Online; accessed 28-05-2015]. endereço: http://www.greenenergyoptions.co.uk/wp-content/uploads/2013/03/CH2R-A-USM-001_003.pdf.
- [22] OpenEnergyMonitor, *Emon*, [Online; accessed 28-05-2015]. endereço: <http://openenergymonitor.org/emon/>.
- [23] ACKSEN, *Electrocorder datasheet*, [Online; accessed 28-05-2015]. endereço: <http://www.electrocorder.com/Portals/0/product-datasheets/PV-3/PV-3-DS-En.pdf>.
- [24] Caresolar, *Innovative data logger for pv monitoring*, [Online; accessed 28-05-2015]. endereço: http://www.caresolar.de/download/broschuere_e_en.pdf.
- [25] Energeno, *Wattson solar plus user manual*, [Online; accessed 28-05-2015]. endereço: http://www.diykyoto.com/store/assets/0000/0846/Wattson_MultiLingual_Manual.pdf.
- [26] OWL, *Getting started with intuition-pv*, [Online; accessed 28-05-2015]. endereço: <http://docs.owlintuition.com/index.php?m=2>.
- [27] S. Log, *User manual*, [Online; accessed 27-05-2015]. endereço: <http://www.solar-log.com/en/products-solutions/solar-log-2000/downloads.html>.
- [28] B. Standard et al., «Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis», *BS EN*, vol. 61724, 1998.
- [29] C. W. Thurston, *Monitoring and data logging services multiply*, [Online; accessed 24-05-2015]. endereço: http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/monitoring-and-data-logging-services-multiply-_100015232/618/#axzz3bLpmx6kE.
- [30] H. G. Beyer, J. Betcke, A. Drews, D. Heinemann, E. Lorenz, G. Heilscher e S. Bofinger, «Identification of a general model for the mpp performance of pv-modules for the application in a procedure for the performance check of grid connected systems», em *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France*, vol. 7, 2004, p. 2004.
- [31] A. Skartveit, J. A. Olseth e M. E. Tuft, «An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo», *Solar Energy*, vol. 63, n° 3, pp. 173–183, 1998.
- [32] A. Drews, A. De Keizer, H. Beyer, E. Lorenz, J. Betcke, W. Van Sark, W. Heydenreich, E. Wiemken, S. Stettler, P. Toggweiler et al., «Monitoring and remote failure detection of grid-

- connected pv systems based on satellite observations», *Solar Energy*, vol. 81, n° 4, pp. 548–564, 2007.
- [33] T. M. Klucher, «Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces», *Solar energy*, vol. 23, n° 2, pp. 111–114, 1979.
 - [34] S. Edwards, D. Bobick e S. Weinzierl, «Impact of harmonic current on energy meter calibration», em *Energytech, 2011 IEEE*, IEEE, 2011, pp. 1–6.
 - [35] J. L. Afonso, R. G. Pregitzer, J. Pinto, L. F. Monteiro, P. Neves, R. Alves, D. Gonçalves, J. Cunha, J. Batista, J. S. Martins et al., «Sinus: Tecnologia para monitorização da qualidade de energia, compensação dinâmica de harmónicos, factor de potência e desequilíbrios e para interface de fontes renováveis», 2007.
 - [36] W. M. Grady e S. Santoso, «Understanding power system harmonics», *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, n° 11, pp. 8–11, 2001.
 - [37] A. Sharma, V. Nayyar, S. Chatterji e R. T. P. Lehana, «Pic microcontroller based svc for reactive power compensation and power factor correction», *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, n° 9, 2013.
 - [38] B. C. Kok, E. Kan, C. Uttraphan e H. H. Goh, «A conceptual design of microcontroller-based power factor corrector circuit.», 2009.
 - [39] M. Dimitrijević e V. Litovski, «Quantitative analysis of reactive power calculations for small non-linear loads», em *Small System Simulation Symposium*, 2012, pp. 150–154.
 - [40] E. Moulin, S. d Electricite e S. Dictionary, «Measuring reactive power in energy meters», *Metering International*, vol. 1, n° 1, pp. 52–54, 2002.
 - [41] O. Krejcar e R. Frischer, «Real time voltage and current phase shift analyzer for power saving applications», *Sensors*, vol. 12, n° 8, pp. 11 391–11 405, 2012.
 - [42] L. Czarnecki, «Budeanu and fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents», *Electrical Engineering*, vol. 80, n° 6, pp. 359–367, 1997.
 - [43] J. L. Willems, «The iee standard 1459: What and why?», em *Applied Measurements For Power Systems (AMPS), 2010 IEEE International Workshop on*, IEEE, 2010, pp. 41–46.
 - [44] M. Schulz, «A progressive way to integrate current measurement into modern power electronic systems», em *Conference Proceedings PCIM2008, Nuremberg*, 2008.
 - [45] D. P. McNutt, «Electrical current sensors», *Chemical Rubber Co*, 1997.
 - [46] J. Fraden, «Handbook of modern sensors», 2010.
 - [47] R. Nilsson, *Circuitos Eléctricos*. 2008.
 - [48] ElectronicsTutorials, *Current transformer basics*, [Online; accessed 23-05-2015]. endereço: <http://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html>.
 - [49] Honeywell, *Hall effect sensing and application*, [Online; accessed 20-04-2015]. endereço: http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847.
 - [50] T. Instruments. (2014). Current shunt monitors. [Online; accessed 20-04-2015], endereço: www.ti.com/currentshuntmonitor.
 - [51] A. TECHNOLOGIES, *Acpl-790b, acpl-790a, acpl-7900 datasheet*, [Online; accessed 19-04-2015]. endereço: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-2733EN>.
 - [52] D. P. L. Par Dr. Joachim Schmid, *Measurement of current and voltage in mv and hv switch-gears with low power instrument transformers*, [Online; accessed 26-05-2015], 2003. endereço:

http://2003.matpost.org/matpostcd/www/pdf/Textes/MT/MT4/Article%20M%2041_P.%20LEQUITTE.pdf.

- [53] ABB. (2015). Current sensors voltage sensors. [Online; accessed 20-04-2015], endereço: https://library.e.abb.com/public/05e94529bfab4388c1257df600558bb3/1SBC140152C0207_TechnicalCatalog%20Current-Voltage%20sensors.pdf.
- [54] J. Meydbray, K. Emery e S. Kurtz, *Pyranometers and reference cells, what's the difference?*, Preprint, [Online; accessed 10-07-2015].
- [55] L. Dunn, M. Gostein e K. Emery, «Comparison of pyranometers vs. pv reference cells for evaluation of pv array performance», em *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, IEEE, 2012, pp. 002 899–002 904.
- [56] H. Holt, «A deeper look into difference amplifiers», *Analogue Dialogue*, vol. 48, 2014.
- [57] REN, *Relatório de qualidade do serviço*, Relatório, [Online; accessed 30-06-2015], 2013.
- [58] Coilcraft, *Cs60 series*, <http://www.farnell.com/datasheets/1870393.pdf>, Datasheet, [Online; accessed 1-07-2015], 2015.

ANEXO A: SOFTWARE

A1: PLATAFORMA WEB

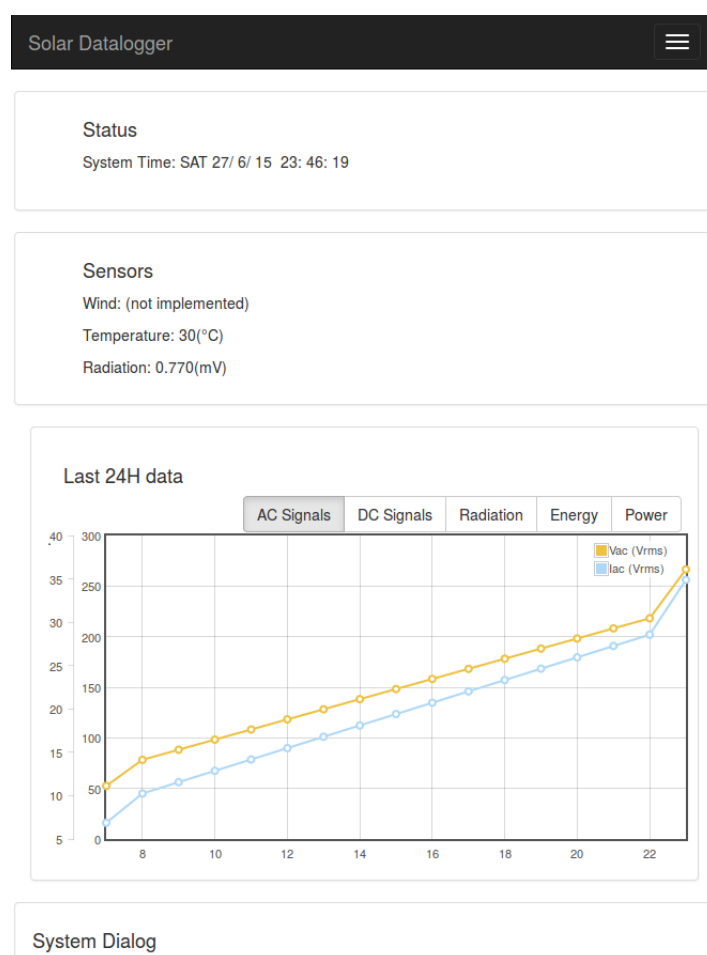


Figura 1: Página de informação geral da plataforma para um ecrã mobile

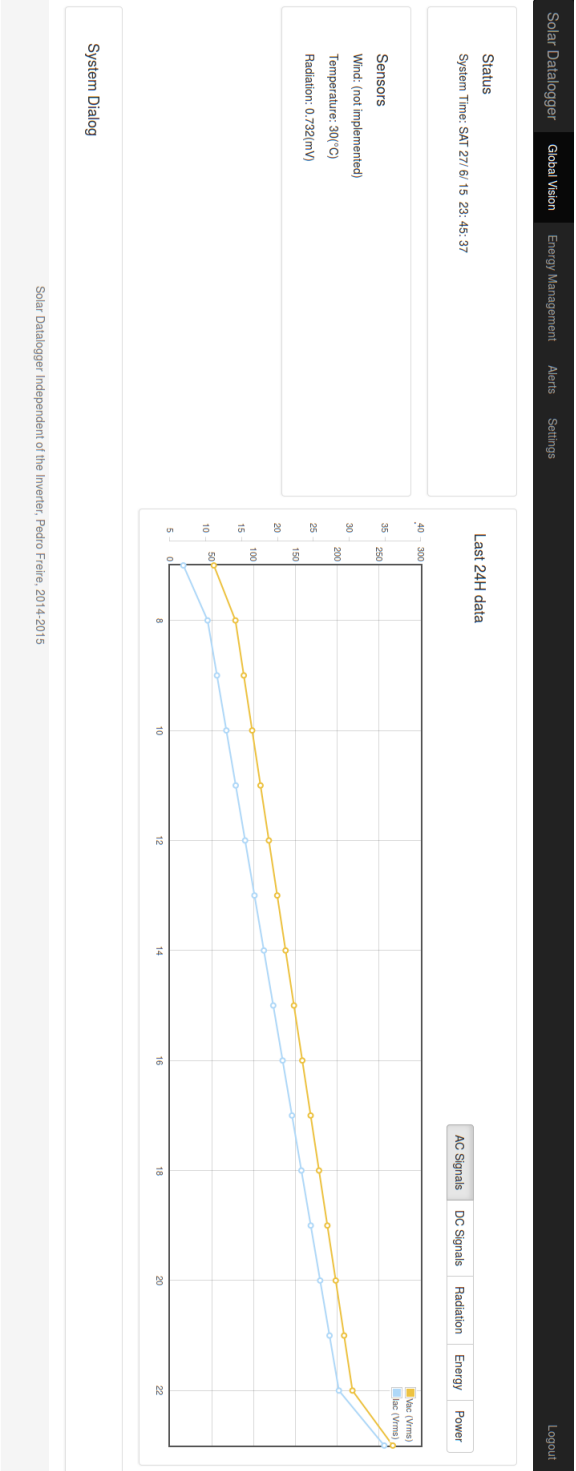


Figura 2: Página geral da plataforma

Solar DataloggerGlobal VisionEnergy ManagementAlertsSettings...Logout

Alerts

Sat New Alert

#TypeRuleTarget ValueOperation

New

.....

+

+

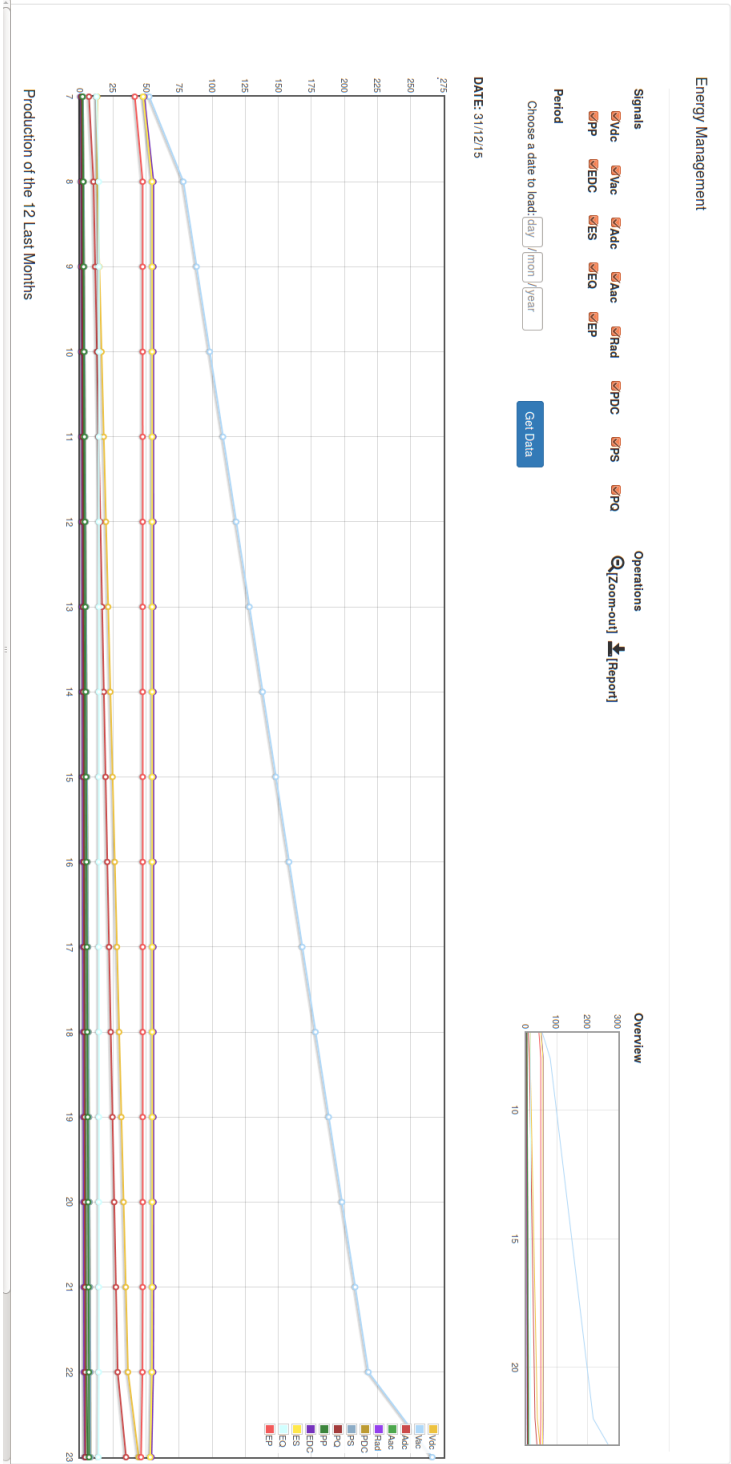
Sat Alert

Active Alerts

#	Type	Rule	Target Value	Operation
1	V CC	V min	10 V	<div><div></div><div>X</div></div>

Solar Datalogger Independent of the Inverter, Pedro Freire, 2014-2015

Figura 3: Página de alertas do sistema



Period

Choose a date to load: / /

Get Data

DATE: 31/12/15

Overview

Production of the 12 Last Months

Figura 4: Página de gestão de energia do sistema

Solar DataloggerGlobal VisionEnergy ManagementAlarmsSettings...Logout

Settings

User Login

admin

User Password

Password

Re-Type User Password

Re-Type Password

User Email

microchip@ua.pt

MAC Address

00:04:A3:00:00:01

Host Name

PLC-WEB-BOX

IP Address

169.254.1.1

Gateway

169.254.1.1

Subnet Mask

255.255.0.0

Primary DNS

169.254.1.1

Secondary DNS

0.0.0.0

Week Day: SAT

21

6

15

Time: 17

30

Save User Settings

Save Server Time

Save Network Settings

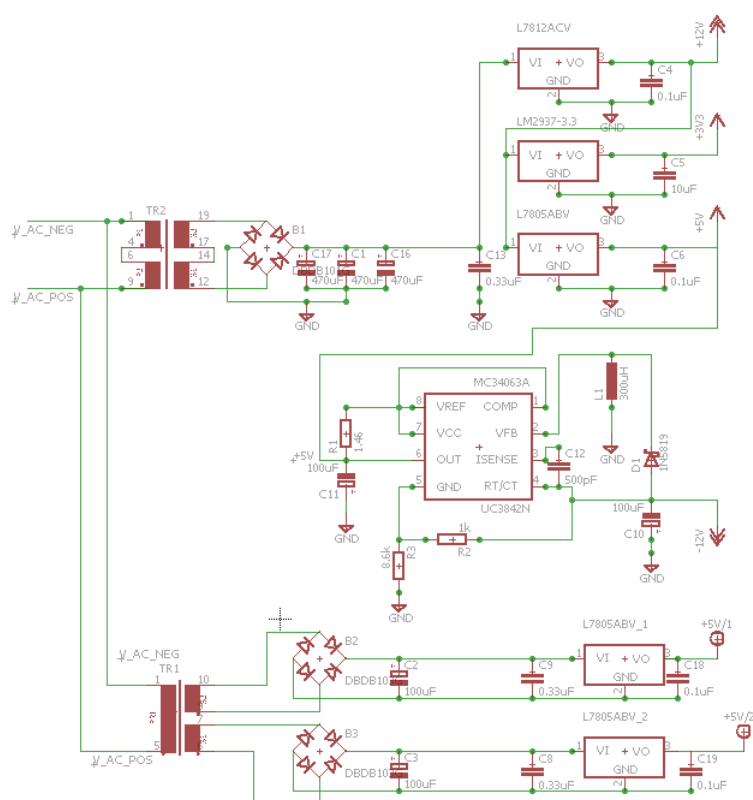
Enable DHCP

Solar Datalogger Independent of the Inverter, Pedro Freire, 2014-2015

Figura 5: Página de definições do sistema

ANEXO B: ESQUEMAS ELÉTRICOS

B1: FONTES DE ALIMENTAÇÃO



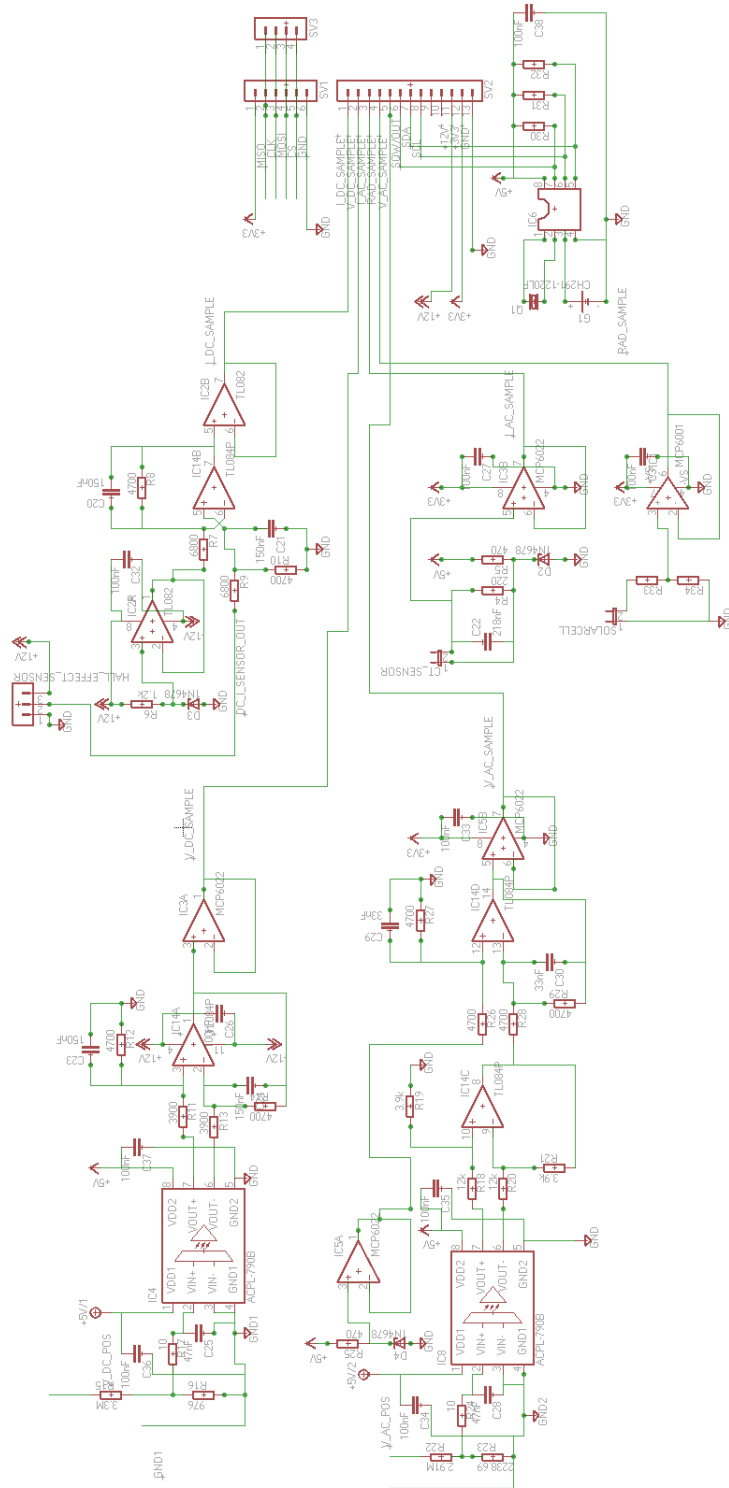


Figura 7: EM010 sensor

ANEXO C: HARDWARE

C1: DESENHO DA PCB NO EAGLE

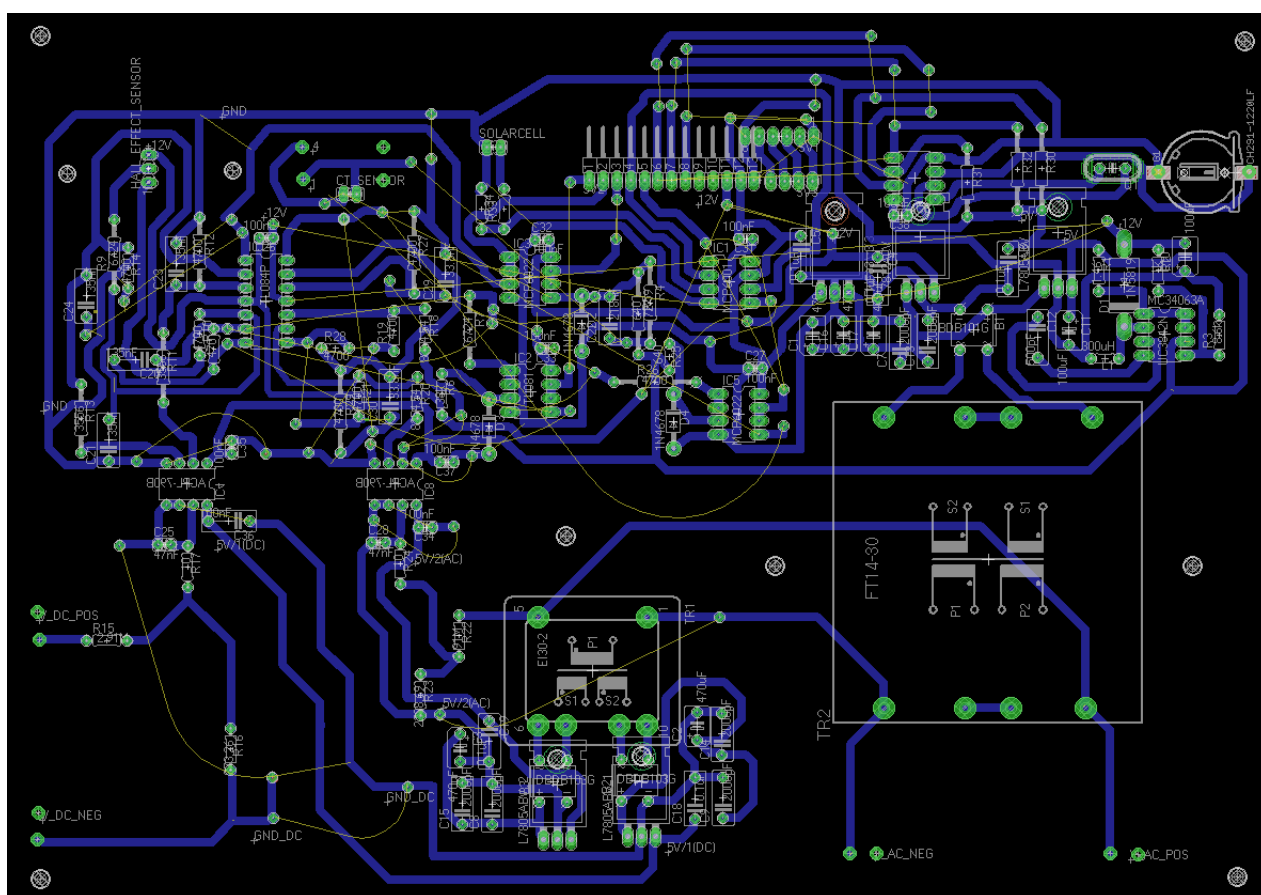


Figura 8: Desenho da PCB no eagle

C2: IMPRESSÃO DA PCB

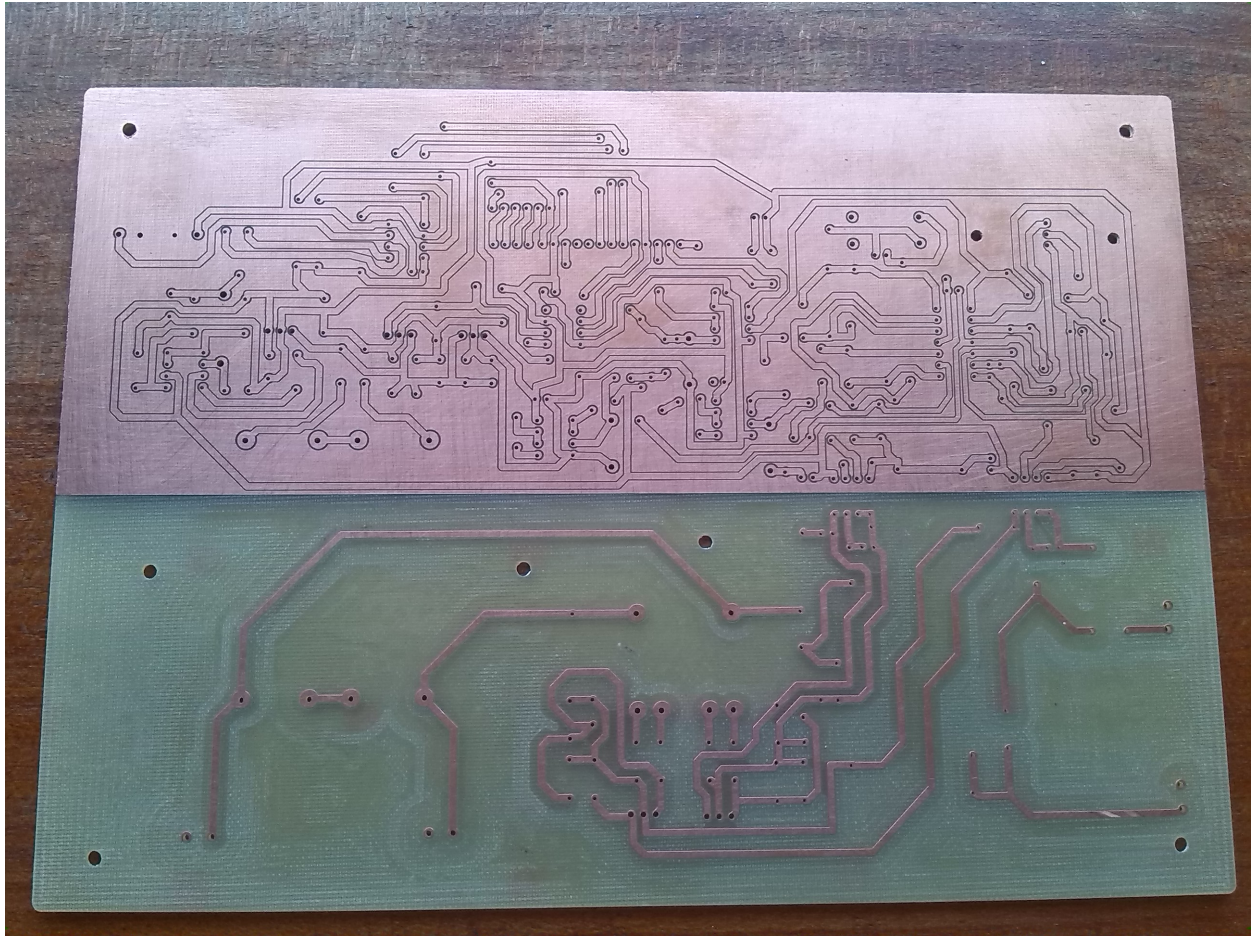


Figura 9: Impressão da PCB

C3: JUNÇÃO DO HARDWARE

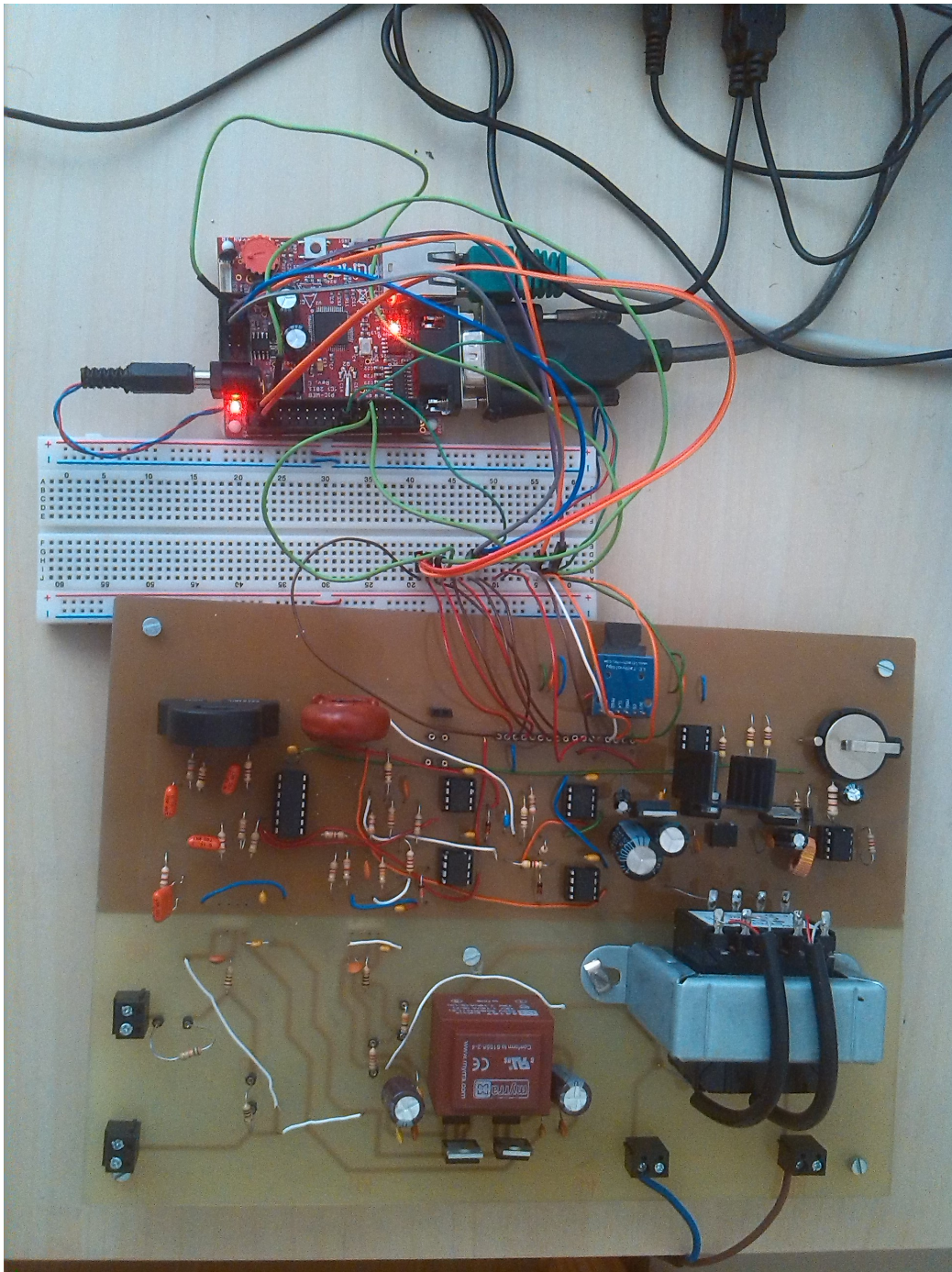


Figura 10: Fotografia do *hardware* do *logger*